

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE CLERMONT-FERRAND

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

EMMANUEL REMY

Ingénieur E. S. E.

Licencié-ès-Sciences Physiques

Licencié en Droit

1^{re} THÈSE. — INTRODUCTION A L'ÉTUDE DU GROUPE
" MACHINE ASYNCHRONE - REDRESSEURS SECS "
ACCOUPLÉ A UN ALTERNATEUR.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 22 Février 1958 devant la Commission d'Examen.

MM. E. DUBOIS

Président

J. JAFFRAY

G. RAOULT

} *Examineurs*

THÈSES
PRÉSENTÉES
A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ
DE CLERMONT-FERRAND

POUR OBTENIR
LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR
EMMANUEL REMY
Ingénieur E. S. E.
Licencié-ès-Sciences Physiques

1^{re} THÈSE. — INTRODUCTION A L'ÉTUDE DU GROUPE
"MACHINE ASYNCHRONÉ - REDRESSEURS SECS"
ACCOUPLÉ A UN ALTERNATEUR
2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 22 Février 1958 devant la Commission d'Examen.

Président	MM. E. DUBOIS
Examineurs	J. JAFFRAY
	G. RAOUT

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE CLERMONT-FERRAND

POUR OBTENIR
LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR
EMMANUEL REMY

Ingénieur E. S. E.
Licencié-ès-Sciences Physiques
Licencié en Droit

1^{re} THÈSE. — INTRODUCTION A L'ÉTUDE DU GROUPE
" MACHINE ASYNCHRONE - REDRESSEURS SECS "
ACCOUPLÉ A UN ALTERNATEUR

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 22 Février 1958 devant la Commission d'Examen.

MM. E. DUBOIS

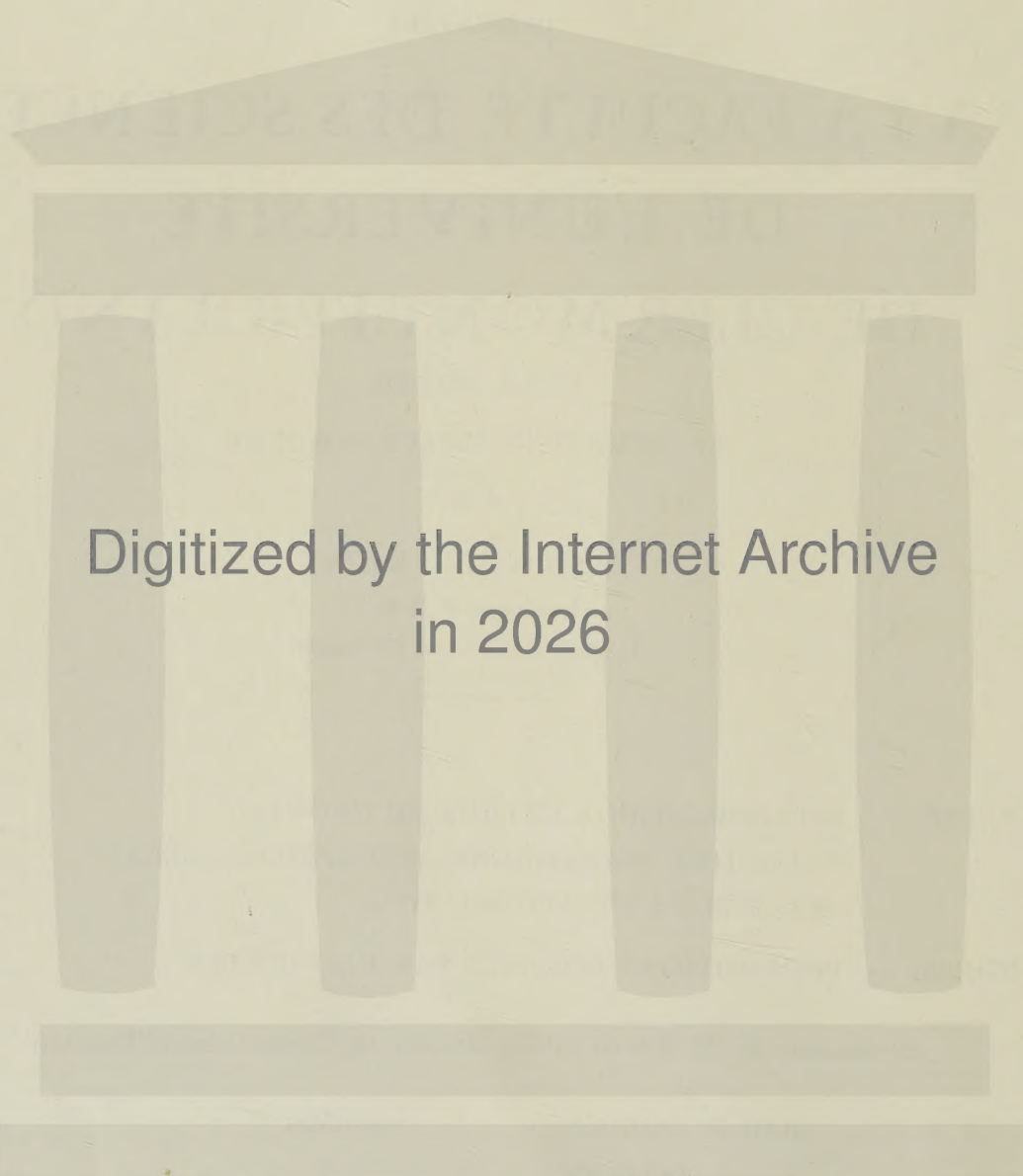
Président

J. JAFFRAY

G. RAOULT

} *Examineurs*





Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548606_0002

FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE CLERMONT - FERRAND

Doyen.....M. DELANGE

PROFESSEURS.

MM.	DUBOIS	Physique Générale
	BLANC	Mécanique Rationnelle
	JAFFRAY	Physique Générale
	RAMBAUD	Chimie Générale
	REMY	Chimie Industrielle
	TRUFFAULT	Chimie Organique
	HOVASSE	Zoologie et Biologie Animale
	CHAZE	Botanique Pure et Appliquée
	ROQUES	Géologie et Minéralogie
	LAPADU-MARGUES	Minéralogie
	SAMUEL	Mathématiques
	RAOULT	Physique
	LUTZ	Zoologie
	CHAMPAGNAT	Botanique
	DUPLESSIS-KERCOMARD	Chimie (P.C.B.)
	TAGLANG	Physique
	PARTAUD	Chimie-Physique
Mme	HENNEQUIN	Mathématiques
M.	AVAN	Physique

Qu'il nous soit permis d'exprimer nos sentiments de respectueuse et profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur DUBOIS, qui nous a fait l'honneur d'accepter d'être notre Président de Thèse et qui s'est vivement intéressé à notre travail, en nous prodiguant de nombreux conseils.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur le Professeur JAFFRAY et à Monsieur le Professeur RAOULT, qui ont bien voulu aussi, comme membres du Jury, examiner nos mémoires.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à Monsieur COMPARAT, Directeur de l'Ecole Centrale Lyonnaise, à Messieurs CLERQUES, Sous-Directeur et WITTLING, Chef de Travaux Pratiques qui, fort aimablement, ont mis à notre disposition un important matériel, nécessaire pour compléter notre travail expérimental.

Notre très amical merci, enfin, à notre bon camarade F. HARTMANN, ingénieur E.S.E., qui est venu souvent, après ses heures de travail, nous aider pour les essais pratiques.

INTRODUCTION.

Les collecteurs et les balais des machines électriques posent de graves problèmes: ils provoquent des étincelles qui en interdisent l'emploi à proximité des matières inflammables et qui créent des parasites dans les émissions et les réceptions radioélectriques. D'autre part, dans certaines conditions de fonctionnement, les balais s'usent très rapidement (Avions volant à haute altitude). Cet inconvénient est d'autant plus grave que le remplacement des balais et la remise en état d'un collecteur peuvent immobiliser une machine pendant un temps assez long.

Il est très difficile de concevoir une solution universelle s'appliquant à toutes les machines électriques.

Nous nous sommes limité à la recherche d'un ensemble SANS contact frottant, pouvant remplacer la dynamo à courant continu dans son fonctionnement en génératrice.

Les importants progrès réalisés récemment dans la technique des redresseurs secs (très faible encombrement des redresseurs au silicium, qui peuvent supporter des

intensités et ces températures élevées) nous ont suggéré d'utiliser ces derniers et de les monter aux bornes de la très simple et très robuste machine asynchrone.

Nous avons alors remarqué que ce montage offre une gamme de solutions à plusieurs problèmes et permet de supprimer les balais d'autres machines électriques.

Pour notre exposé, nous adopterons le plan suivant:

- Chapitre 1. - Présentation du groupe machine asynchrone-redresseurs secs.
- Chapitres 2 & 4. - Théorie du fonctionnement.
- Chapitre 3. - Partie expérimentale.
- Appendice. Application à d'autres machines électriques (Génératrices et Motrices).

Conclusions

- Résultats techniques intéressant le spécialiste.
- Point de vue de l'utilisateur avec applications pratiques.

CHAPITRE 1.

PRÉSENTATION DU GROUPE

MACHINE ASYNCHRONE -- REDRESSEURS

A. -- GÉNÉRATRICE A COURANT CONTINU SANS COLLECTEUR ET SANS BALAIS (x)

La dynamo classique se compose (Planche 1 fig.1) d'un inducteur fixe (4), d'un induit tournant (5), d'un collecteur et des balais (2). L'inducteur comporte des pôles saillants; le collecteur est constitué par des lames de cuivre; les balais sont plus ou moins nombreux suivant l'intensité du courant.

De cette dynamo, gardons l'inducteur et l'induit; supprimons le collecteur et les balais; remplaçons par un dispositif "redresseurs-transformateur dynamique" dans une machine

(x) Brevet français n° 1.040.722. Génératrice de courant continu sans collecteur ni balais. E. REMY.

ENNEPHE : DYNAMO COLLECTEUR ET SANS BALAIS

Le collecteur habituel (fig.1) est remplacé par des redresseurs secs montés aux bornes du stator d'une machine asynchrone (fig.2)

Figure 1 : Dynamo classique

- (1) Collecteur constitué par des lames de cuivre
- (2) Balais en graphite
- (4) Inducteur fixe
- (5) Induit mobile

Figure 2 : Groupe équivalent

- (1) Primaire de la machine asynchrone (Rotor)
- (2) Secondaire d^s (Stator)
- (3) Redresseurs secs montés aux bornes du stator (2)
- (4) Inducteur fixe de la dynamo
- (5) Induit mobile de la dynamo

Les rotors (1) et (5) des deux machines tournantes A (dynamo, ou alternateur à inducteur fixe) et B (machine asynchrone) sont montés en cascade SANS aucun contact frottant.

Planche 1

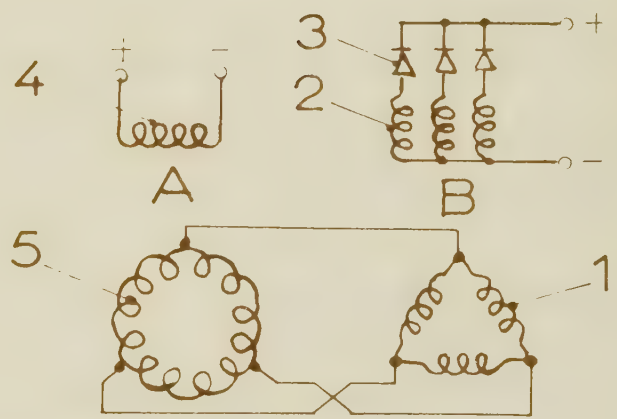
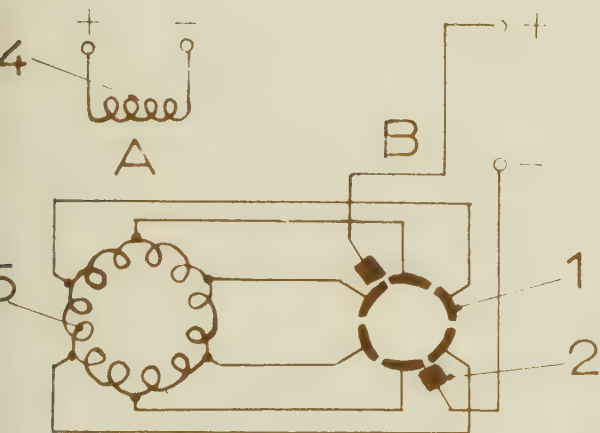
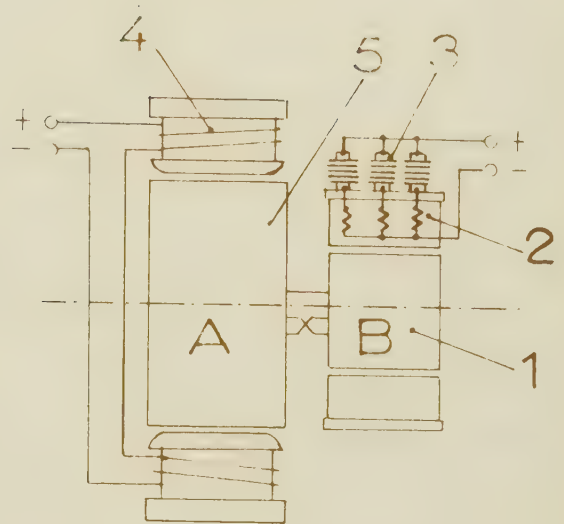
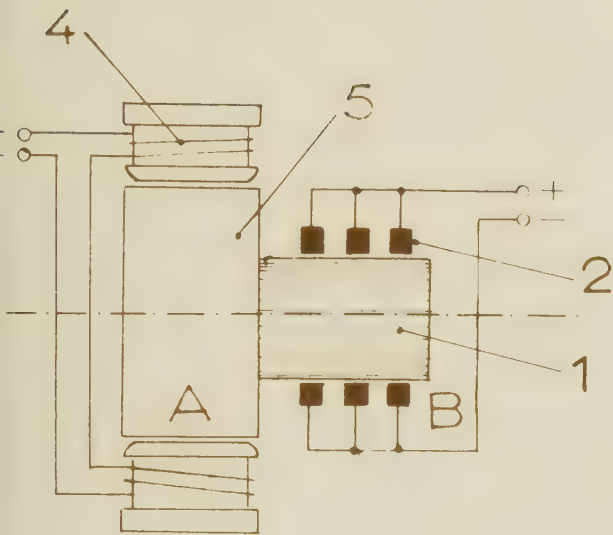


FIGURE 1

FIGURE 2

DYNAMO
CLASSIQUE

GROUPE
EQUIVALENT

une nouvelle dynamo sans commutateur et sans balais (fig. 1)

On sait, en effet, que l'induit d'une dynamo fournit du courant alternatif polyphasé. Il est donc possible de faire débiter son induit sur le même arbre que la machine à induction fonctionnant en "générateur" ou "moteur". Les deux machines sont montées sur le même arbre et le même support. Le rotor de la machine à induction est fixé sur l'arbre de la dynamo et le stator de la machine à induction est fixé sur le bâti de la machine.

Les bobines statoriques (2) de la machine à induction sont dans l'espace il peut être relié directement (sans contacts) aux bornes de la machine à induction (1) qui sont montés sur le bâti de la machine.

Nous remplaçons le volant et le collecteur en cuivre, équipé de ses balais et de ses segments (fig. 2) par une machine simple à induction. Il devient ainsi une machine à induction simple à induction. Pour employer le langage technique, nous dirons que la machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes. La machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes. La machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes.

On peut remarquer que la machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes. La machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes. La machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes. La machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes.

Un "transformateur" ayant un rapport de transformation de 1:1 (fig. 3) est relié à la machine à induction. Le courant de la machine à induction est relié à la machine à induction par ses bornes. La machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes. La machine à induction est reliée à la machine à induction par ses bornes.

Une grande latitude dans la réalisation est offerte

au constructeur. Il peut conserver les inducteurs à pôles saillants de la dynamo; il peut également conserver son induit avec son enroulement "en manteau". Le couplage de cet induit avec le "collecteur magnétique" pourra même être du type "triangle" (fig.2).

Il est cependant intéressant de remarquer que la machine principale n'est pas autre chose qu'un alternateur inversé dont l'inducteur serait fixe et l'induit tournant. Cet induit pourra être bobiné comme celui d'une machine alternative: ses phases pourront être couplées aussi bien en étoile qu'en triangle.

Rien n'empêche, en vue de faciliter la construction de cette machine, d'abandonner les pôles saillants et d'adopter un stator du type "lisse", analogue à celui du moteur à induction qui lui est accouplé. De même, comme nous le verrons ultérieurement, il est possible d'adopter un nombre de pôles identique pour les deux machines les bobinages rotatifs étant, de plus, identiques, le groupe obtenu présentera une grande simplicité de construction (machines montées dans la même carcasse) et, en conséquence, permettra un prix de revient intéressant.

Remarquons, d'autre part, qu'on peut réaliser, avec une machine à induction, les mêmes montages de redresseurs que ceux utilisés habituellement avec les transformateurs statiques, le bobinage statorique de la machine à induction jouant le rôle de secondaire. On pourra utiliser ainsi les montages usuels "en pont".

Les redresseurs les plus simples pour ce genre d'application, sont du type "sec" rondement réglé, entretien nul, vie longue, rapidité de réponse. L'autoexcitation de la génératrice est possible. On peut réduire facilement l'ondulation résiduelle

à être comparable à celle fournie par un collecteur. Il est intéressant de noter que le rendement des redresseurs secs est pratiquement constant pour de très grandes variations de la charge. Les redresseurs secs ne produisent aucun parasite radioélectrique.

Vu de l'extérieur, l'ensemble est équivalent à une dynamo: on a deux bornes pour les extrémités des bobinages inducteurs et deux bornes pour le courant continu fourni par le "collecteur magnétique". Il est alors aisé de réaliser les montages d'excitation usuels: excitation séparée, shunt ou série; on peut également prévoir une excitation compound avec un inducteur comportant un enroulement série et un enroulement shunt.

Il est intéressant de constater que la nouvelle génératrice sans collecteur et sans balais possède des possibilités de couplage et des caractéristiques analogues à celles des machines à courant continu habituelles.

B. - GÉNÉRATRICE MIXTE A COURANT CONTINU ET A COURANT ALTERNATIF SANS COLLECTEUR ET SANS BALAIS. (x)

(Planche 2)

La figure 4 montre le principe de la génératrice mixte à courant alternatif et continu. On reconnaît en (4) l'inducteur de la génératrice, en (5) le bobinage induit de son rotor (machine A), en (1) et (2) la machine à induction (machine B) qui, associée aux redresseurs (3), constitue le "collecteur magnétique".

Aux bornes de cet ensemble, l'utilisateur recueille à la fois du courant continu et du courant alternatif SANS FAIRE USAGE DE BALAIS: le courant alternatif est disponible sur le stator (2) de la machine à induction, le courant continu aux bornes des redresseurs (3).

PLANCHE 2

GÉNÉRATRICE MIXTE A COURANT CONTINU ET A COURANT ALTERNATIF
SANS COLLECTEUR ET SANS BALAIS.

Figure 3: Groupe classique

- (1) Bagues collectrices en cuivre
- (2) Balais en graphite
- (3) Redresseurs secs
- (4) Inducteur fixe de l'alternateur A
- (5) Induit tournant
- (6) Transformateur abaisseur de tension

Figure 4 : Nouveau groupe

- (1) Primaire de la machine asynchrone (Rotor)
- (2) Secondaire d° (Stator)
- (3) Redresseurs secs
- (4) Inducteur fixe de l'alternateur A
- (5) Induit tournant d°

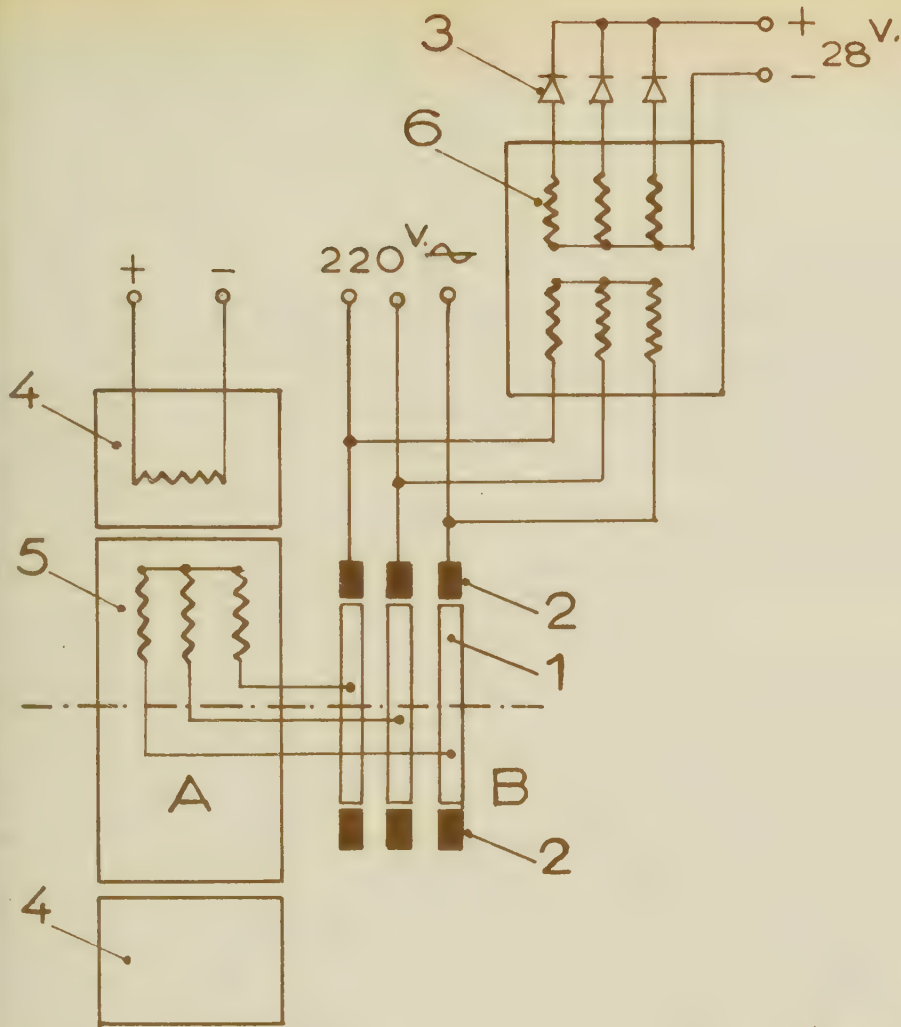


FIGURE 3
GROUPE
CLASSIQUE

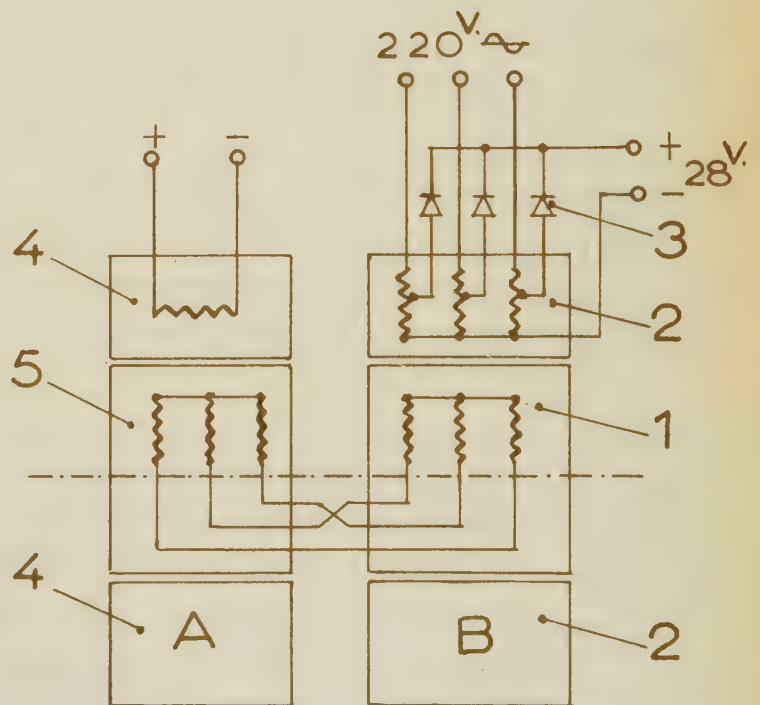


FIGURE 4
NOUVEAU GROUPE

Il est, de plus, possible de faire un bobinage secondaire à prises multiples fournissant des tensions différentes, ou même de prévoir deux bobinages secondaires distincts : l'un, donnant une tension élevée et l'autre, donnant une tension plus faible.

A l'aide d'un double couplage ou d'un double jeu de redresseurs, on pourrait disposer de deux tensions continues différentes ou simplement d'une tension continue inférieure à la tension alternative.

La figure 3 représente un ensemble classique équivalent : on voit en (1) les bagues d'un alternateur à inducteur fixe, le courant alternatif, à la tension 220 volts, est disponible sur les balais (2); le transformateur statique (6) alimente les redresseurs (3) sous tension réduite.

La solution de la figure (4) constitue la fusion des éléments (2) et (6) : le transformateur statique devient dynamique et joue le rôle, à la fois, de "balais magnétiques" et de transformateur abaisseur de tension. Au point de vue poids et encombrement, on note la suppression du transformateur statique, la suppression des bagues, balais, porte-balais et des dispositifs d'antiparasitage. La réalisation de redresseurs secs avec des plaques métalliques en alliage léger permettrait d'alléger encore l'ensemble.

Nous verrons, de même, que le nombre des pôles de la génératrice unique équivalente au groupe se répartit sur les deux machines, d'où, diminution du nombre de pôles de chaque machine.

De plus, nous montrerons que, dans certaines conditions, la puissance totale produite par le groupe générateur se répartit sur les deux machines tournantes, si bien que l'alternateur constituant la première machine n'aura à fournir qu'une partie des kilowatts produits par le groupe (dimensions réduites).

Le montage proposé supprime la dynamo "excitatrice" montée habituellement en bout d'arbre des alternateurs

Il apporte une solution intéressante au problème posé par la production simultanée de courant continu et de courant alternatif à des tensions différentes sur les avions modernes .

On a constaté, en effet, que, au-dessus de 8 à 9 000 mètres d'altitude, les alternateurs qui fonctionnaient sous une densité de courant élevée, étaient à changer au bout de deux heures (usure de 6 mm.) (x)

(x) L. DUC Société Française des Electriciens Janvier 1950.
Influence de l'altitude et des températures extrêmes sur le comportement des matériels électriques à bord des avions.

CHAPITRE 2

=====

ETUDE DU

FONCTIONNEMENT.

Le groupe générateur sans balai est constitué par deux machines qui présentent les particularités suivantes: la première n'est pas autre chose qu'un alternateur synchrone à inducteur fixe (alternateur usuel dans lequel on a interverti les positions de l'inducteur et de l'induit); la deuxième est une machine asynchrone à secondaire fixe (machine asynchrone à induction usuelle dans laquelle on a interverti les positions du primaire et du secondaire.).

Ces deux machines sont connectées électriquement "en cascade rotorique": le rotor de la première alimente le rotor de la deuxième (montage en cascade classique dans lequel on a interverti le rôle du stator et du rotor de la deuxième machine; au lieu de faire débiter le rotor de la première sur le stator de la deuxième, on a fait débiter les deux rotors l'un sur l'autre).

On a calé les deux rotors sur le même arbre (montage en "cascade directe") et on a disposé des redresseurs aux bornes du stator de la deuxième machine, de façon à constituer un ensemble équivalent à une machine à courant continu sans contacts frot-
tants.

Les conditions habituelles de fonctionnement de la machine asynchrone sont modifiées. Elles diffèrent sensiblement de celles du simple moteur à induction: son rotor, au lieu d'être en court-circuit, est monté en série avec l'enroulement de la première machine.

On traitera la première machine (machine A) "en alternateur" fournissant énergie active et réactive au rotor de la deuxième. Celle-ci (machine B) pourra être considérée comme un "changeur de fréquence" transformant la fréquence primaire f_1 fournie par l'alternateur en une fréquence secondaire f_2 appliquée aux redresseurs.

§. I. - CONVENTION DE SIGNES POUR LES VITESSES.

Les machines A et B étant calées sur le même arbre, adoptons le sens de rotation de l'arbre comme sens positif de rotation.

Un champ tournant sera positif s'il tourne dans le sens de l'arbre, négatif s'il tourne en sens contraire.

La vitesse angulaire Ω_e du moteur d'entraînement sera dans ces conditions, considérée comme positive.

§. II. - FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE A (Alternateur).

Le champ fixe produit par l'inducteur fixe (4) de l'alternateur (fig. 4) donne naissance dans le rotor (5) entraîné par le moteur B à un système de courants polyphasés. Ces courants induits produisent un champ tournant, par rapport au rotor, dans le sens contraire de sa rotation et à la vitesse $\Omega_A = -\Omega_e$ (sens négatif de rotation).

Si p_A est le nombre de paires de pôles de la machine A, la pulsation ω_1 et la fréquence f_1 des courants rotatifs sont

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \Omega_E p_A \\ f_1 &= \frac{N_E}{60} p_A \end{aligned} \quad \text{avec} \quad N_E = \frac{60 \Omega_E}{2\pi}$$

N_E étant la vitesse de rotation du moteur d'entraînement en tours/minute.

III. - FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE B (Machine ASYNCHRONES).

Le rotor (1) de la machine d'induction B étant monté en série avec le rotor précédent, les mêmes courants polyphasés y circulent; ils créent, dans l'entrefer de la machine B, un champ tournant radial dont la vitesse angulaire relative Ω_r (vitesse par rapport au rotor) est donnée par la relation:

$$\Omega_r = \frac{\omega_1}{p_B}$$

p_B étant le nombre de paires de pôles du bobinage rotorique de la machine B.

et, en remplaçant ω_1 par sa valeur :

$$\Omega_r = \Omega_E \frac{p_A}{p_B}$$

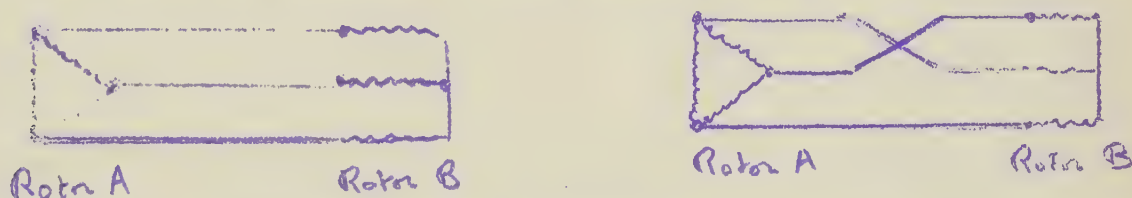
La vitesse absolue Ω_s de ce champ tournant (vitesse par rapport au stator fixe) résulte de la composition de la vitesse Ω_E du rotor et de la vitesse relative Ω_r .

$$\Omega_s = \Omega_E \pm \Omega_r$$

Suivant la manière dont les connexions électriques ont été réalisées entre les deux rotors, les vitesses Ω_E et Ω_r s'ajouteront ou se retrancheront.

Nous dirons que les connexions sont "directes", lorsque, dans leur mouvement relatif par rapport à l'arbre commun, les champs tournants des machines A et B tournent dans le même sens. Elles seront "inversées" ou "croisées", lorsque, dans leur mouvement relatif par rapport à l'arbre commun, les champs des machines A et B tournent en sens contraire.

On peut passer des connexions "directes" aux connexions "croisées", soit en permutant deux phases entre rotors:



soit en retournant la machine B bout pour bout
(électriquement ou mécaniquement)



1^{er} cas: Connexions croisées.

Si les connexions électriques entre les deux rotors sont croisées, les courants rotoriques produisent, dans l'entrefer de la machine B, un champ qui tourne, par rapport au rotor, dans le sens de sa rotation, à la vitesse $\Omega_{r,1}$ (sens positif de rotation).

Par rapport à un observateur fixe, lié au stator, la vi

tesse résultante de rotation de ce champ est:

$$\Omega_s = \Omega_E + \Omega_r$$

$$\Omega_s = \Omega_E \left(1 + \frac{p_A}{p_B}\right)$$

La pulsation du courant induit dans le bobinage statique de la machine à induction (bobinage secondaire du transformateur de fréquence) est, d'autre part :

$$\omega_2 = \Omega_s \cdot p_B$$

D'où, les relations suivantes donnent la pulsation et la fréquence des courants dans le stator de la machine à induction:

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \Omega_E (p_A + p_B) \\ f_2 &= \frac{N_E}{60} (p_A + p_B) \end{aligned}$$

Les courants secondaires de pulsation ω_2 circulant dans le stator de la machine B produisent, à leur tour, un champ tournant radial de vitesse angulaire égale à Ω_s . Les deux champs tournants ont la même vitesse et se composent.

1^{re} Remarque. - Les équations précédentes permettent de considérer l'ensemble des deux machines en cascade comme équivalent à une machine synchrone unique tournant à la même vitesse N_E , fournissant des courants à la même fréquence f_2 et ayant un nombre de paires de pôles p égal à la somme $(p_A + p_B)$ des paires de pôles des deux machines

$$f_2 = \frac{N_E}{60} p$$

avec

$$p = p_A + p_B$$

2° Remarque . - Si nous désignons par m le rapport des pulsations et des fréquences primaire (rotor) et secondaire (stator), nous aurons:

$$m = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{p_A}{p_A + p_B}$$

3° Remarque . - Si nous définissons γ par la relation algébrique

$$\gamma = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{N_B - N_E}{N_S}$$

avec les conventions de signes ci-dessus pour les vitesses, le paramètre γ représente l'écart relatif entre la vitesse Ω_r du rotor et la vitesse Ω_s du champ tournant de la machine asynchrone. Il peut donc être positif ou négatif suivant les valeurs de Ω_r et de Ω_s en remplaçant Ω_s par sa valeur établie plus haut en fonction de p_A et p_B on aura, dans le cas des connexions croisées:

$$\gamma = \frac{p_A}{p_A + p_B} = \frac{f_1}{f_2} > 0$$

on remarque que le paramètre γ , qui est lié par une relation simple aux nombres de pôles des deux machines

et aux fréquences primaire et secondaire, peut s'identifier algébriquement au "glissement" d'un moteur asynchrone qui tournerait à la vitesse Ω_E , le champ tournant produit par le stator de ce moteur tournant lui-même à la vitesse Ω_S . Autrement dit, en écrivant la relation définissant le paramètre γ , nous avons implicitement considéré la machine B comme un moteur asynchrone classique dont la vitesse synchrone Ω_S serait donnée par la fréquence f_2 des courants statoriques.

4^e Remarque. - Si nous appelons q le rapport des nombres de paires de pôles p_A et p_B des machines A et B, les relations précédentes restent inchangées quelles que soient les valeurs de ce rapport (Nous verrons plus loin que tel n'est pas le cas lorsque les connexions entre rotors sont "directes"):

$$q = \frac{p_A}{p_B} = \text{valeur quelconque}$$

En effet, quel que soit le nombre des pôles de la machine A par rapport à celui de la machine B, le champ tournant de cette dernière tournera, par rapport à un observateur fixe, dans le même sens que le rotor et plus vite que ce dernier (addition des vitesses)

$$0 < N_E < N_S$$

$$\text{avec } N_S = N_E \left(1 + \frac{p_A}{p_B} \right)$$

Le paramètre γ satisfera, d'autre part, à la condition:

$$0 < \gamma < 1$$

puis qu'on a toujours: $\Omega_S > \Omega_E$

$$\text{et } \gamma = 1 - \frac{\Omega_E}{\Omega_S}$$

2° Cas: Connexions directes .

Si les connexions électriques entre les deux rotors sont directes, les champs des machines A et B tournent dans le même sens par rapport au rotor (sens négatif de rotation).

Dans son mouvement relatif par rapport au rotor, le champ, dans l'entrefer de la machine B, tournera en sens contraire du rotor, à la vitesse angulaire $-\Omega_r$.

Par rapport à l'observateur fixe, lié au stator, la vitesse angulaire résultante de ce champ est égale à la différence des vitesses :

$$\boxed{\Omega_s = \Omega_E - \Omega_r}$$

$$\text{soit, } \Omega_r = \Omega_E \frac{p_A}{p_B}$$

$$\text{donc, } \boxed{\Omega_s = \Omega_E \left(1 - \frac{p_A}{p_B} \right)}$$

Dans ces conditions, la valeur du rapport $q = \frac{p_A}{p_B}$ va jouer un rôle tout-à-fait remarquable. Suivant que q est inférieur, égal ou supérieur à l'unité, la vitesse, Ω_s , sera, en valeur absolue, inférieure, égale ou supérieure à Ω_E ; et en conséquence, la vitesse résultante Ω_s sera positive, nulle ou négative.

Examinons ces différentes valeurs de q :

- a) Le rapport q est inférieur à l'unité: la machine A possède, dans ce cas, un nombre de paires de pôles p_A inférieur à celui de la machine B

$$\boxed{q < 1}$$

$$\boxed{p_A < p_B}$$

La vitesse angulaire Ω_1 du champ tournant, par rapport au rotor, est alors inférieure à la vitesse de ce dernier.

Par conséquent, la vitesse angulaire résultante Ω_2 de ce champ, par rapport au stator fixe, est positive.

$$\Omega_2 = (\Omega_E - \Omega_1) > 0$$

ce qui signifie que le champ tournant de la machine B tourne, par rapport à un observateur fixe, dans le sens du rotor mais moins vite que ce dernier:

$$0 < N_S < N_E$$

avec
$$N_S = N_E \left(1 - \frac{p_A}{p_B} \right)$$

Ce fonctionnement est particulièrement intéressant; la pulsation du courant induit dans le bobinage statorique de la machine asynchrone est alors:

$$\omega_2 = \Omega_2 p_B = \Omega_E \left(1 - \frac{p_A}{p_B} \right) p_B$$

D'où, les relations simples suivantes donnant la pulsation et la fréquence des courants dans le stator de la machine asynchrone;

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \Omega_E (p_B - p_A) \\ f_2 &= \frac{N_E}{60} (p_B - p_A) \end{aligned}$$

La machine unique équivalente au groupe posséderait un nombre de paires de pôles p égal à la différence $(p_B - p_A)$; la fréquence des courants disponibles à ses bornes serait

$$f_2 = \frac{N_s}{2} p$$

avec

$$p = (p_B - p_A)$$

Le rapport des fréquences primaire et secondaire est, dans ces conditions

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{p}{p_B - p_A}$$

Le rapport relatif du rotor par rapport au stator

$$\frac{\Omega_r - \Omega_E}{\Omega_s} = \frac{\Omega_r}{\Omega_s} = \frac{\Delta \omega_E}{\Delta \omega} \frac{\omega_s}{\omega_r}$$

$$\gamma = \frac{p_A}{p_B - p_A}$$

$$p_A < p_B$$

$$\gamma < 1$$

un nombre de pôles égal à celui de la machine B

$$q = 1$$

$$p = p_B$$

$$\Omega_r = \Omega_E \quad \Omega_s = \Omega_E - \Delta \omega_p = 0$$

$$N_s = 0$$

Le champ rotorique de la machine B est fixe dans l'espace. Le paramètre γ tend vers l'infini; il en est de même du rapport

une fréquence. Les Forces électromotrices induites dans le sta-

Résumé. - Précisons que cette conclusion concerne seulement le cas des connexions directes entre rotors (Cas actuellement étudié) et effet si nous croisons les connexions en conservant l'égalité des nombres de pôles sur les deux machines, on obtient:

$$\begin{aligned} a &= 1 & \Omega_r &= \Omega_e & N_r &= N_e \\ a &= \frac{1}{p} & \Omega_r &= \frac{1}{p} \Omega_e & N_r &= \frac{1}{p} N_e \end{aligned}$$

2) Le nombre a est supérieur à l'unité la machine A possède un nombre de paires de pôles p_A supérieur à celui de la machine B.

Les connexions étant "directes" entre rotors, on a:

$$\boxed{a > 1} \quad \boxed{p_A > p_B}$$

$$\begin{aligned} \Omega_r &> \Omega_e \\ b &= (\Omega_r - \Omega_e) < 0 \end{aligned}$$

$$\boxed{\omega < 0}$$

Le champ tournant de la machine B tourne, par rapport à un observateur fixe, dans le sens inverse du rotor.

La pulsation et la fréquence des courants dans le stator de la machine asynchrone sont alors:

$$\begin{aligned} \omega &= \Omega_e (p_A - p_B) \\ f &= \frac{\Omega_e}{2\pi} (p_A - p_B) \end{aligned}$$

Le rapport des fréquences devient:

$$\eta = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{p_A}{p_A - p_B}$$

Le paramètre η prend la valeur:

$$\eta = \frac{-\Omega_S - \Omega_E}{-\Omega_E} = \frac{\Omega_S + \Omega_E}{\Omega_S} = \frac{(\Omega_P - \Omega_E) + \Omega_E}{(\Omega_P - \Omega_E)} = \frac{\Omega_E \frac{p_A}{p_B}}{\Omega_E \left(\frac{p_A}{p_B} - 1 \right)}$$

d'où:

$$\eta = \frac{p_A}{p_A - p_B}$$

$$p_A > p_B$$

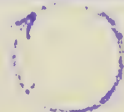
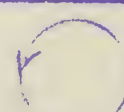
$$\eta > 1$$

Le paramètre η est toujours supérieur à l'unité.

TABLEAU

20

Résumant le SENS de rotation des champs tournants.

Définition d'un sens positif de rotation		
Sens de rotation des rotors: vitesse Ω_E		$\Omega_E > 0$
Champ dans la machine A: Vitesse Ω_A par rapport au rotor		$\Omega_A < 0$
Champ dans la machine B: Vitesse Ω_r p. rapport au rotor Vitesse Ω_s p. rapport au stator		
1) Connexions croisées ϕ_A quelconque $\alpha < \gamma < 1$ ϕ_B	Ω_r  Ω_s 	$\Omega_s = (\Omega_E + \Omega_r)$
2) Connexions directes $\phi_A < \phi_B; \Omega_r < \Omega_E; \gamma < 0$	Ω_r  Ω_s 	$\Omega_s = (\Omega_E - \Omega_r)$
$\phi_A = \phi_B; \Omega_r = \Omega_E; \gamma = \infty$	 	$\Omega_s = 0$
$\phi_A > \phi_B; \Omega_r > \Omega_E; \gamma > 1$	 	$\Omega_s = (\Omega_r - \Omega_E)$

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE



OFFICE OF THE SECRETARY

WASHINGTON, D. C.

RECEIVED

1917

1917

1917

1917

1917

1917

5. IV. - NOMENCLATURE DES LOIS DE TRANSFORMATION

On définit les lois de transformation des nombres de pôles et des fréquences en fonction du paramètre γ .

Le rapport n entre la vitesse N_E du moteur d'entraînement et la vitesse N_S du champ tournant de la machine B peut s'écrire:

$$n = \frac{N_E}{N_S} = 1 - \gamma$$

n est positif lorsque le rotor et le champ tournent dans le même sens ($\gamma < 1$).

n est négatif, lorsque le rotor tourne en sens contraire du champ ($\gamma > 1$).

Le rapport q entre les nombres de paires de pôles p_A et p_B des machines A et B s'exprime en fonction du paramètre γ par les relations:

$$q = \frac{p_A}{p_B} = \frac{\gamma}{1 - \gamma}$$

lorsque les connexions entre rotors sont "croisées"

$$q = \frac{p_A}{p_B} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

lorsque les connexions entre rotors sont "directes"

Ces relations conduisent à un rapport q toujours positif, quel que soit le sens des connexions entre rotors.

Le rapport m entre les fréquences primaire (rotor de la machine A) et secondaire (rotor de la machine B) s'exprime:

$$m = \frac{f_1}{f_2} = \gamma$$

lorsque γ est positif

$$m = \frac{f_1}{f_2} = -\gamma$$

lorsque γ est négatif

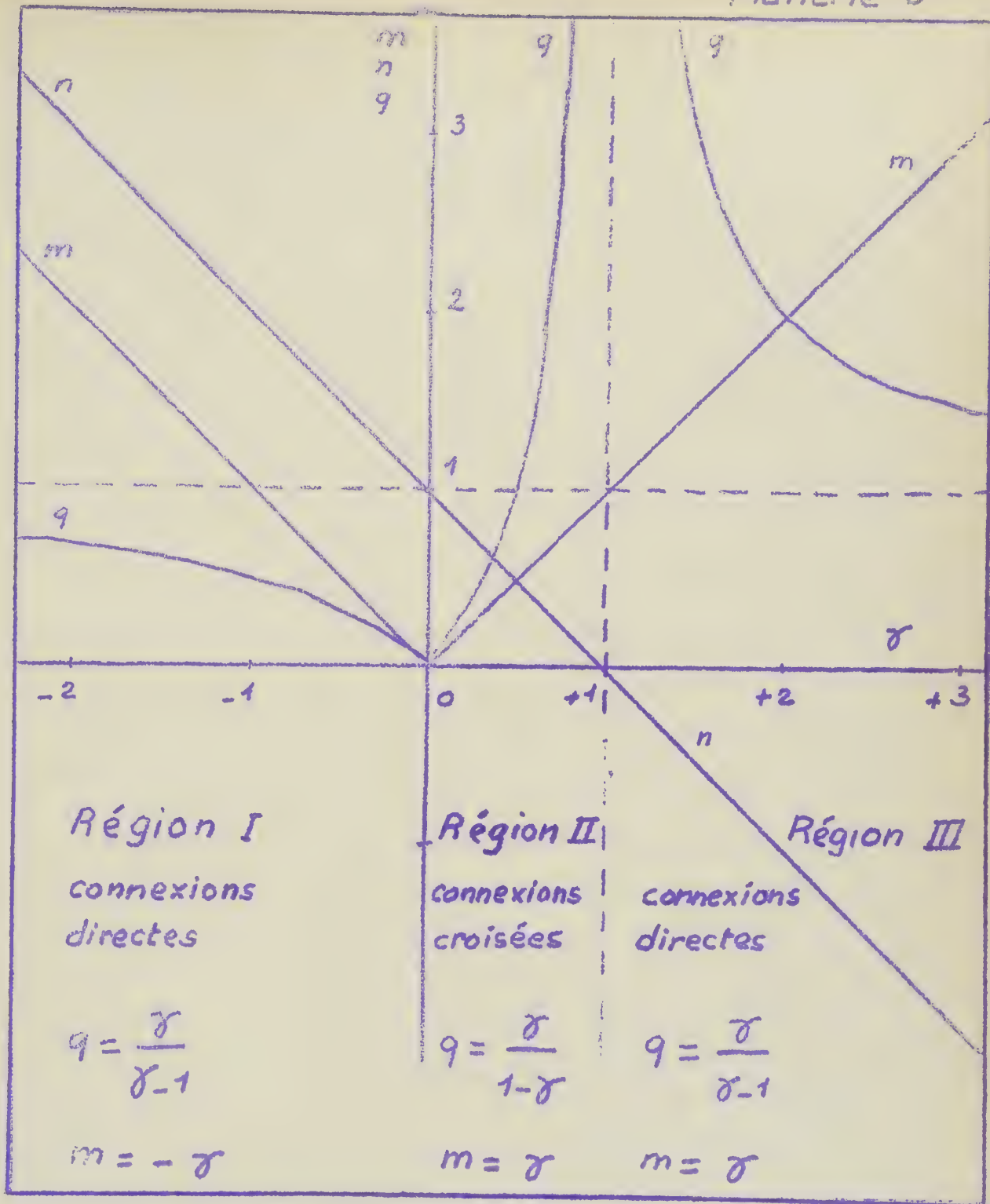
Le rapport m entre les fréquences sera, dans ces conditions, toujours positif, quelle que soit la valeur du paramètre γ .

Les relations précédentes montrent que le choix du rapport m des fréquences impose un rapport n entre les vitesses N_C et N_B , et un rapport q entre les nombres de paires de pôles P_A et P_B .

D'où, le tableau permettant de construire les courbes donnant les rapports des vitesses n , des fréquences m et des nombres de pôles q (Planche 3) :

	Connexions Directes			Connexions croisées			Connexions Directes		
γ	-1	-1/2	-1/3	+1/3	+1/2	+1/3	+3/2	+2	+1
n	2	3/2	4/3	2/3	1/2	1/3	-1/2	-1	-2
m	1	1/2	1/3	1/3	1/2	2/3	1/2	2	3
q	1/2	1/3	1/4	1/2	1	2	3	2	3/2

le rapport des vitesses n en fonction du paramètre γ est représenté par une droite coupant l'axe des abscisses



n : rapport des vitesses N_s/N_s en fonction de σ

m : rapport des fréquences f_1/f_2 en fonction de σ

q : rapport des nombres de pôles P_A/P_B en fonction de σ



au point $q = 1$ et l'autre des branches au point $q = 1/2$. Les parties séparées situées dans l'une des branches possèdent des vitesses opposées.

Le rapport des nombres de pôles q en fonction du paramètre Y est représenté par trois courbes continues. La première pour asymptote verticale la droite $Y = +1$ et pour asymptote horizontale la droite $q = 1$ correspond à l'alignement $p_A = p_B$ des trois branches. L'hyperbole se situe en évidence dans les régions

Région I	Région II	Région III
$Y < 0$	$0 < Y < 1$	$Y > 1$
$Y = \frac{-p_A}{p_B - p_A}$	$Y = \frac{p_A}{p_A - p_B}$	$Y = \frac{p_A}{p_A - p_B}$
$q = \frac{p_A}{p_B} < 1$	q quelconque	$q = \frac{p_A}{p_B} > 1$
Connexions directes	Connexions croisées	Connexions directes
Champ tournant dans le sens du rotor, moins vite que le rotor	Champ tournant dans le sens du rotor, plus vite que le rotor	Champ tournant en sens inverse du rotor, à une vitesse quelconque

On remarque que le nombre de paires de pôles p_A de la machine A (Alternateur) est inférieur au nombre des paires de pôles p_B de la machine B (machine synchronisme) pour les valeurs de Y inférieures à $1/2$. Il est supérieur à p_B pour Y supérieur à cette valeur :

$\gamma < +1/2$	$\gamma = +1/2$	$\gamma > +1/2$
$p_A < p_B$	$p_A = p_B$	$p_A > p_B$

Notons la valeur particulière $\gamma = +1/2$ conduisant à l'égalité des nombres de pôles pour les deux machines, le nombre de paires de pôles p de la machine unique équivalente au groupe se répartit alors sur les deux machines de façon à donner à chacune la moitié du nombre de pôles p .

$$p_A = p_B = \frac{p}{2}$$

La valeur $\gamma = +1$ correspondrait, par contre, à un nombre de paires de pôles p_A infini par rapport au nombre de paires de pôles p_B .

On voit que, à chaque valeur du rapport q des nombres de pôles correspondent deux valeurs du paramètre γ , on passe de l'une à l'autre par "croisement" ou "décroisement" des connexions entre les rotors des machines A et B.

Exemple: $p_A = 1$ $p_B = 2$ $q = 1/2$

Connexions directes : $\gamma = -1$

Connexions croisées : $\gamma = +1/3$

Le rapport q des fréquences est représenté par deux droites passant par l'origine et symétriques par rapport à l'axe des ordonnées.

Il apparaît aussi que, à chaque valeur du rapport des nombres de pôles, correspondent, suivant le sens des connexions rotoriques, deux rapports de fréquences différents.

en reprenant l'exemple précédent

avec $N_E = 1\,500$ t/min $p_A = 1$ $p_B = 2$

connexions directes : $\gamma = -1$; $f_1 = 25$ Hz ; $f_2 = 25$ Hz

connexions inverses : $\gamma = +1/3$; $f_1 = 25$ Hz ; $f_2 = 75$ Hz

Le point singulier $\gamma = 0$ correspondrait à une vitesse du rotor égale à celle du champ tournant et à un nombre de pôles nul pour la machine A. Plus on se rapproche de cette vitesse, plus la fréquence des courants rotoriques est voisine vis-à-vis de la fréquence des courants statoriques du rotor de la machine B. Plus on s'éloigne de ce point singulier, plus les pertes dans le fer des deux rotors sont faibles (les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont, en effet, respectivement proportionnelles à la fréquence et au carré de la fréquence).

On ne peut évidemment choisir $\gamma = 0$ comme point de fonctionnement, mais il serait intéressant, pour diminuer les pertes dans le fer des rotors, de rester au voisinage de cette valeur.

Suivant les valeurs du paramètre γ , on peut distinguer trois zones de fonctionnement:

$\gamma < -1$	$-1 < \gamma < +1$	$\gamma > +1$
$m > 1$ $f_1 > f_2$	$m < 1$ $f_1 < f_2$	$m > 1$ $f_2 > f_1$

Il est très remarquable de noter que la zone de la fréquence f_1 des courants rotoriques est inférieure à la fréquence f_2 des courants statoriques de la machine B, lorsque γ est compris entre -1 et $+1$.

§. V.- FORMULES GENERALISEES.

Définition d'une "PULSATION ALGEBRIQUE".

On pourrait simplifier les calculs précédents et aboutir à des formules plus générales, en convenant d'appeler "PULSATION GENERALISEE" (ou "Pulsation algébrique") d'un système de courants triphasés parcourant un bobinage donné, le paramètre ω , qui, par définition, serait égal en valeur absolue à la pulsation des courants triphasés qui sont le signe conventionnel de la pulsation du champ magnétique créé par ces courants. On se rappelle que ce dernier est le résultat par rapport à un contour fixe du bobinage.

On pourrait, de la même façon, définir une "FREQUENCE GENERALISEE" (ou "Fréquence algébrique") et nous appellerons ω_1 la "pulsation généralisée" du rotor de la machine A, ω_2 celle du rotor (primaire) de la machine B, et ω_3 celle du stator (secondaire) de la même machine B, nous aurons.

- Bobinage rotorique de la machine A : $\omega_A < 0$

Il faut, en effet, considérer le sens de rotation du champ H_1 dans son mouvement relatif par rapport au bobinage rotorique. Le sens est négatif, car le champ tourne en sens contraire de celui du rotor qui a été choisi comme sens positif.

- Bobinage rotorique de la machine B:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= +\omega_A \text{ lorsque les connexions sont "directes"} \\ \omega_1 &= -\omega_A \text{ "croisées"}\end{aligned}$$

Le champ H_1 , créé par les courants de pulsation ω_1 dans la machine B, tourne, en effet, dans le même sens que le champ créé par les courants de pulsation ω_A dans la machine A, lorsque les connexions sont "directes"; il tourne en sens contraire de

II. Lorsque les connexions sont "croisées" (mouvement par rapport aux bobinages rotoriques).

D'où, le tableau suivant qu'on peut rapprocher de celui qui donne le sens de rotation des champs (page 20):

Pulsation généralisée	ω_A	ω_1	ω_2	$m = \frac{\omega_1}{\omega_2}$
Connexions croisées	-	+	+	+
Connexions directes				
$ q < 1$	-	-	+	-
$ q = 1$	-	-	-	-
$ q > 1$	-	-	-	+

Avec ces nouvelles conventions de signe, les raisonnements précédemment faits sur les champs tournants se réduisent à de simples calculs algébriques.

Le nombre des vitesses devient algébrique; on a dans tous les cas

$$\Omega_S = \Omega_E + \Omega_r$$

Le rapport m des pulsations devient, lui aussi, algébrique; il est alors égal, en grandeur et en signe au paramètre γ

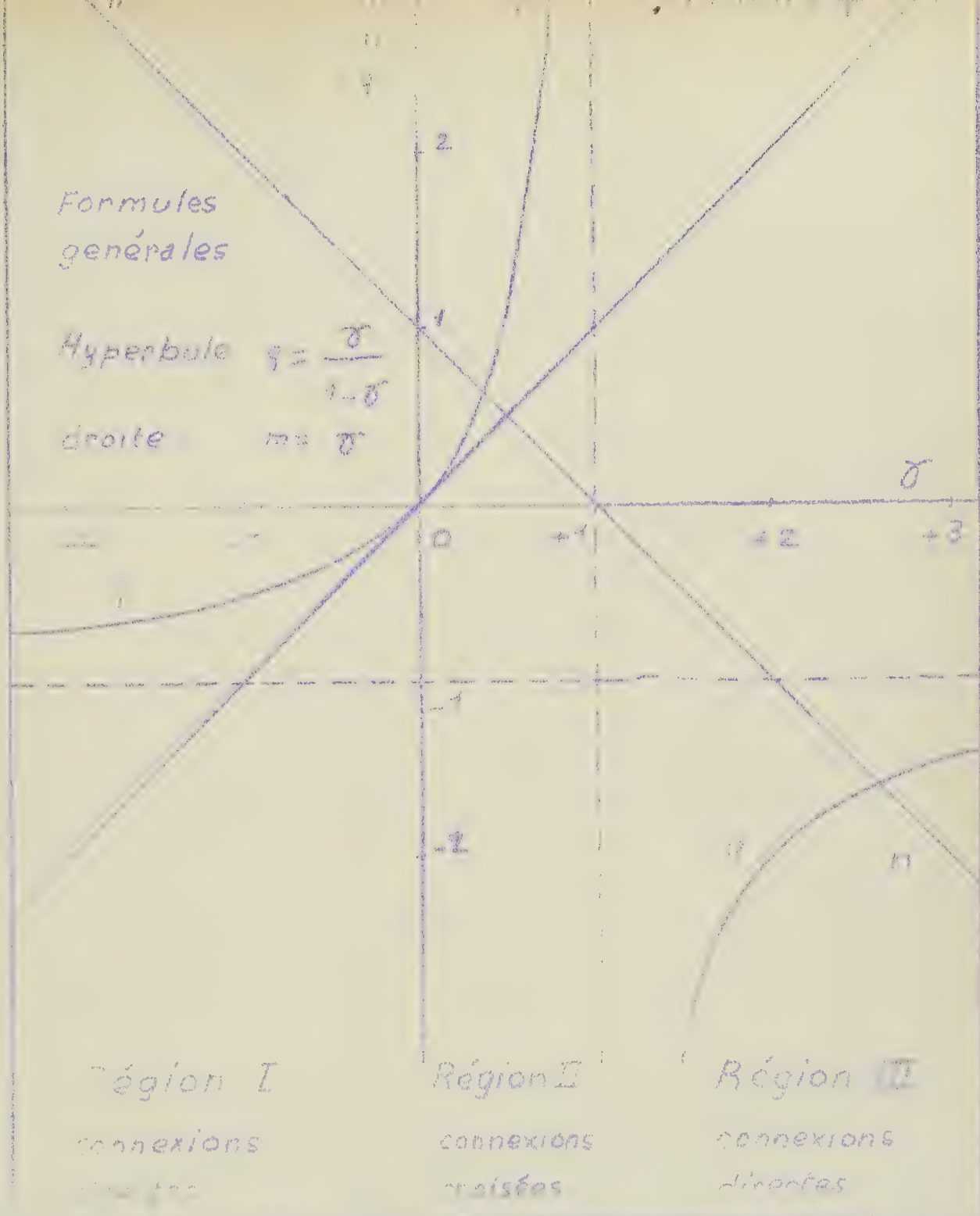
$$m = \gamma$$

Il est représenté par une droite d'équation $m = \gamma$. Cette droite unique remplace les deux demi-droites d'équation $m = \gamma$ et $m = -\gamma$ obtenues précédemment; elle traverse l'axe des abscisses au point $\gamma = 0$, la partie négative correspondant à

Formules
générales

Hyperbole $q = \frac{\sigma}{1-\sigma}$

droite $m = \sigma$



n : rapport des vitesses V_1/V_2 en fonction de σ

m : rapport des fréquences F_1/F_2 en fonction de σ

q : rapport des nombres de pôles P_1/P_2 en fonction de σ

des collections généralisées $\mathcal{D}_1$ et $\mathcal{D}_2$ de signes opposés.

- Convention de signe pour le rapport q des nombres de pôles

Afin d'avoir une formule universelle englobant tous les cas particuliers "croisés" et "directes", on pourrait, de plus, faire la convention de signe suivante pour le rapport q des nombres de pôles des deux machines :

Le rapport q sera considéré comme positif,
lorsque les connexions sont "croisées",
négatif,
lorsque les connexions sont "directes".

$q < 0$	Connexions "directes"
$q > 0$	"croisées"

Dans ces conditions, le rapport q est représenté par une hyperbole équilatère équivalente à l'équation générale, applicable dans tous les cas :

$$q^2 - 1 = \frac{Y}{X}$$

(Cette hyperbole unique, avec ses deux branches opposées, représente les portions d'hyperboles obtenues précédemment, la branche verticale, pour les connexions croisées, et la branche horizontale, pour les connexions directes. La droite $q = -1$ est la limite des connexions croisées pour $Y = 0$ (branche $q = -1$), et la droite $q = 1$ est la limite des connexions directes pour $X = 0$ (branche $q = 1$)).

FORMULES GENERALISEES

Les conventions de signe précédentes, pour q et m , permettent d'écrire les formules absolument générales:

$$\boxed{\gamma = m} \quad \text{avec} \quad m = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

$$\boxed{\gamma = \frac{q}{q-1}} \quad \text{avec} \quad q = \frac{\phi_A}{\phi_B}$$

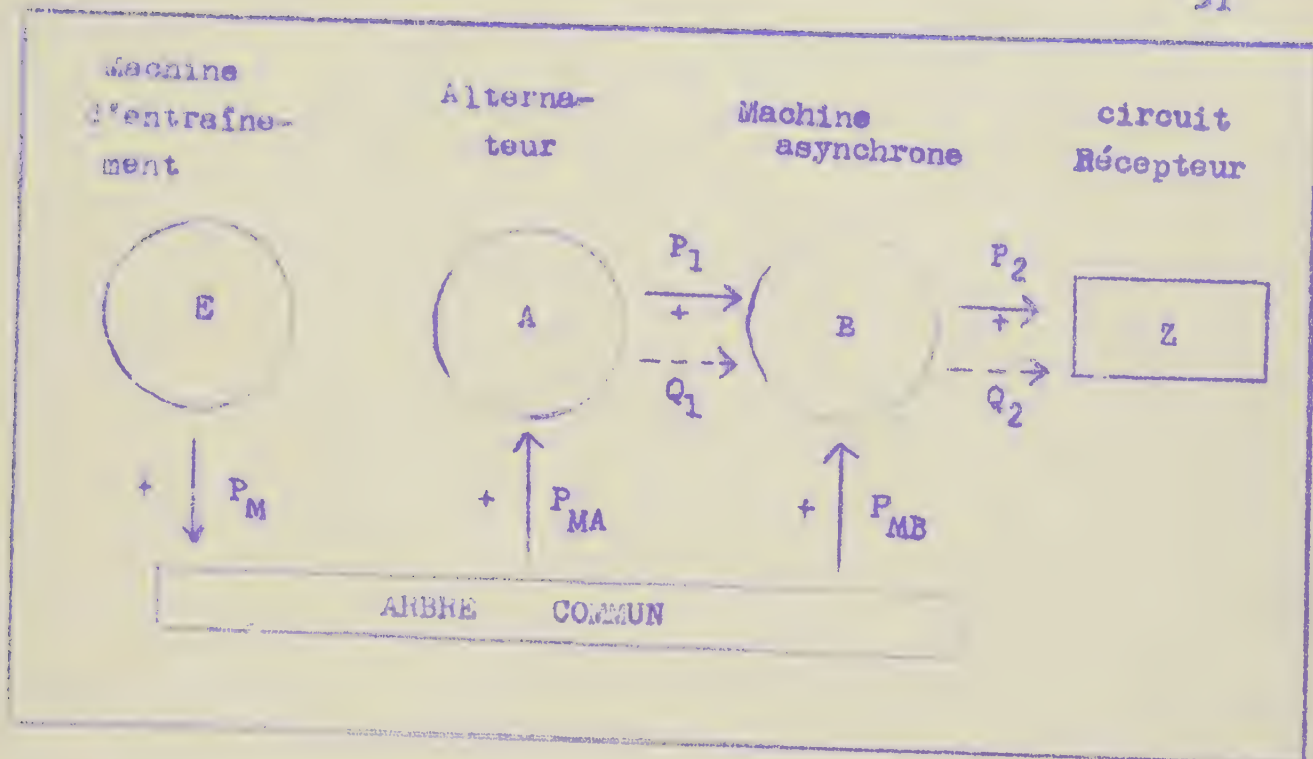
Exemples d'application des formules généralisées:

$\phi_A = 1$ $\phi_B = 2$ connexions croisées	$q > 0$	$q = +1/2$	$\gamma = +1/2$
$\phi_A = 1$ $\phi_B = 2$ d° directes	$q < 0$	$q = -1/2$	$\gamma = -1$
$\phi_A = 2$ $\phi_B = 2$ d° Croisées	$q > 0$	$q = +1$	$\gamma = +1/2$
$\phi_A = 2$ $\phi_B = 1$ d° directes	$q < 0$	$q = -2$	$\gamma = +2$

0 0 0 0 0 0 0

1.1.1 - CONVENTIONS DE SIGNES POUR LES PUISSANCES

- P_1 et Q_1 : puissances électriques active et réactive du primaire, sont considérées comme positives, lorsqu'elles sont fournies par l'alternateur A (puissance absorbée par la machine asynchrone B).
- P_2 et Q_2 : puissances électriques active et réactive du secondaire, sont considérées comme positives, lorsqu'elles sont absorbées par le récepteur B (puissance fournie par la machine B).
- P_m : puissance mécanique du moteur d'entraînement E positive, lorsqu'elle est fournie par le moteur E à l'arbre commun.
- P_{me} : puissance mécanique de la machine A, positive, lorsqu'elle est absorbée par l'alternateur.
- P_{ma} : puissance mécanique de la machine B, positive, lorsqu'elle est absorbée par la machine asynchrone.



2.2.2 - ÉQUATIONS CIRCUIRES DE LA MACHINE B

Considérons la machine B comme un transformateur de fréquence dont le rotor (primaire) serait relié à l'alternateur A de tension V_1 et de fréquence f_1 et dont le stator (secondaire) serait connecté à un circuit-récepteur Z.

Nous ne tiendrons pas compte des pertes dans le fer. Vous avez vu, en effet, au chapitre précédent, qu'on obtenait convenablement les fréquences f_1 et f_2 en peut supposer les pertes dans le fer négligeables à côté des puissances mises en jeu.

La loi d'Ohm s'écrit, en notation complexe, pour le circuit récepteur :

$$\text{Récepteur: } \underline{V}_2 = (R_2 + j\omega_2 L_2) \underline{I}_2$$

et, pour la machine asynchrone:

$$\text{Stator: } \underline{V}_2 = (R_2 + j\omega_2 L_2) \underline{I}_2 + j\omega_2 M \underline{I}_1$$

$$\text{Rotor: } \underline{V}_1 = (R_1 + j\omega_1 L_1) \underline{I}_1 + j\omega_1 M \underline{I}_2$$

avec la relation suivante, donnée au chapitre précédent, entre les pulsations:

$$\omega_1 = m \omega_2$$

étant les courants dans le rotor (primaire, indice 1) et le stator (secondaire, indice 2),

étant les tensions simples aux bornes correspondantes,

étant les résistances des bobinages rotoriques et statoriques,

étant l'inductance totale (réelle comprise)

le coefficient de mutuelle inductance entre rotor et stator,

la résistance du circuit récepteur son inductance totale.

les pulsations des courants dans le rotor et le stator,

le rapport des pulsations rotorique et statorique à l'unité imaginaire.

Nous adopterons les notations suivantes pour les grandeurs complexes et les valeurs efficaces (Convention de l'Union

V, I en capitales romaines, écriture droite:

valeurs efficaces de la tension et du courant,

$\underline{V}, \underline{I}$

en capitales italiques, écriture penchée: valeurs
efficaces complexes de la tension et du courant,

$\underline{V}^*, \underline{I}^*$

en capitales italiques avec astérisque: valeurs
efficaces complexes conjuguées correspondantes.

Les vecteurs $\underline{I}_1$ et $\underline{I}_2$ sont en phase avec $\underline{V}_1$ et $\underline{V}_2$ et d'arguments $-\psi_1$ et $-\psi_2$ par rapport aux axes réels.

$$\underline{I}_1 = I_1 | -\psi_1$$

$$\underline{I}_2 = I_2 | -\psi_2$$

Leurs modules sont égaux à :

mêmes modules et d'arguments opposés:

$$\underline{I}_1^* = I_1 | \psi_1$$

$$\underline{I}_2^* = I_2 | \psi_2$$

Transformons les équations de la machine asynchrone en les multipliant par leurs quantités conjuguées $\underline{I}_1^*$ pour le rotor (primaire) et $\underline{I}_2^*$ pour le stator (secondaire) de façon à faire apparaître les puissances complexes $\underline{S}_1$ et $\underline{S}_2$.

$$\underline{S}_1 = \underline{V}_1 \underline{I}_1^* = (R_1 + j\omega_1 L_1) \underline{I}_1 \underline{I}_1^*$$

$$\underline{S}_2 = -\underline{V}_2 \underline{I}_2^* = -(R_2 + j\omega_2 L_2) \underline{I}_2 \underline{I}_2^* - j\omega M \underline{I}_1 \underline{I}_2^*$$

Le signe positif de $\underline{S}_1$ correspond à une puissance absorbée par la machine A. Le signe negatif de $\underline{S}_2$ correspond à une puissance fournie par la machine B.

En remarquant que

$$\underline{I}_1 \underline{I}_1^* = I_1^2$$

$$\underline{I}_2 \underline{I}_2^* = I_2^2$$

et, en posant : $\psi_1 = \psi_2 = \psi$

$\omega_1 \frac{d\psi_1}{dt}$ est la puissance réactive du rotor de la machine A.

$\omega_2 \frac{d\psi_2}{dt}$ est la puissance réactive du stator de la machine A.

On a de même:

Pour le stator:

$$P_2 = -V_2 I_2 \cos \varphi_2 = -R_2 I_2^2 + \omega_2 M I_1 I_2 \sin u$$

$$= -V_2 I_2 \sin \varphi_2 = -\omega_2 \frac{L}{2} I_2^2 - \omega_2 M I_1 I_2 \cos u$$

φ_2 étant l'angle de déphasage entre le courant I_2 et la tension V_2 .

Remplaçons ω_1 par $m \omega_2$; multiplions les puissances P_2 et Q_2 par $-m$ et ajoutons, membre à membre, les puissances actives, d'une part, les puissances réactives, d'autre part.

Puissances actives:

$$-m P_1 - P_2 = -J_1 - J_2$$

en posant : $J_1 = R_1 I_1^2$ et $J_2 = R_2 I_2^2$

J_1 et J_2 sont les pertes Joule dans le rotor (indice 1) et dans le stator (indice 2);

P_1 est la puissance active fournie par l'alimentation (absorbée par la machine asynchrone);

P_2 est la puissance active reçue par le récepteur Z (fournie par la machine asynchrone)

Puissances réactives:

$$-m Q_1 - Q_2 = -Q_0$$

en posant:

$$Q_0 = \omega_1 \frac{L}{2} I_1^2 + \omega_2 \frac{L}{2} I_2^2 + 2 \omega_2 M I_1 I_2 \cos u$$

Q_0 étant la somme des puissances réactives de l'excitation et d'excitation perdues dans la machine asynchrone.

Q_1 est la puissance réactive fournie à la machine asynchrone par l'alternateur;

Q_2 est la puissance réactive fournie au circuit-récepteur Z par la machine asynchrone.

Puissances mécaniques:

Le principe de la conservation de l'énergie active permet, de plus, d'écrire, avec les conventions de signe adoptées:

$$P_2 = P_1 + P_{MB} - J_1 - J_2 - M_B$$

P_{MB} étant la puissance mécanique prise sur l'arbre par la machine asynchrone;

M_B représentant les pertes mécaniques (ventilation et frottement dans la machine asynchrone);

J_1 et J_2 , les pertes "Joule" définies ci-dessus.

La puissance P_{MB} étant, de plus, liée à la puissance fournie par la machine d'entraînement par la relation algébrique:

$$P_M = P_{MA} + P_{MB}$$

P_M étant la puissance totale fournie par le moteur d'entraînement;

P_{MA} , puissance mécanique prise sur l'arbre par l'alternateur A pouvant s'écrire avec les conventions de signe choisies:

$$P_{MA} = P_1 + (J_A + M_A)$$

J_A et M_A sont respectivement les pertes "Joule" et les pertes mécaniques dans la machine A (on néglige les pertes "fer" pour la même raison que précédemment).

Les puissances P_{MA} et P_{MB} s'expriment en fonction des couples résistants C_A et C_B des machines A et B

$$P_{MA} = C_A \Omega_1 \quad P_{MB} = C_B \Omega_2$$

avec Ω_1 , vitesse angulaire du système comme un tout, mesurée, dans une position donnée, ω_1 et secondaire ω_2 , ainsi qu'aux nombres de paires de pôles p_A et p_B des machines A et B par les relations :

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p_A} = \frac{\omega_2}{p_B} = \frac{(1-s)\omega_1}{p_B}$$

on pourra, d'ailleurs, identifier un paramètre γ avec les conventions de signe faites à ce sujet au chapitre précédent.

1.3.- INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES ÉQUATIONS GÉNÉRALIS.

Les équations précédentes sont tout-à-fait générales et peuvent s'appliquer quel que soit le sens de propagation des puissances: la machine A peut fonctionner en alternateur ou en moteur; la machine B peut être moteur ou réceptrice; le circuit secondaire Z peut être récepteur ou générateur.

A) Conditions pour que le groupe soit générateur

Si le circuit extérieur Z fournit de la puissance au groupe, celui-ci se comporte "en moteur" vis à vis de la machine A (puissance P_A négative, puissance P_B négative). Nous n'examinerons pas cette éventualité, se discutant tout de suite à la présente fin de ce paragraphe, d'ailleurs être réglée par cette dernière.

Nous nous proposons, par contre, de discuter le cas où

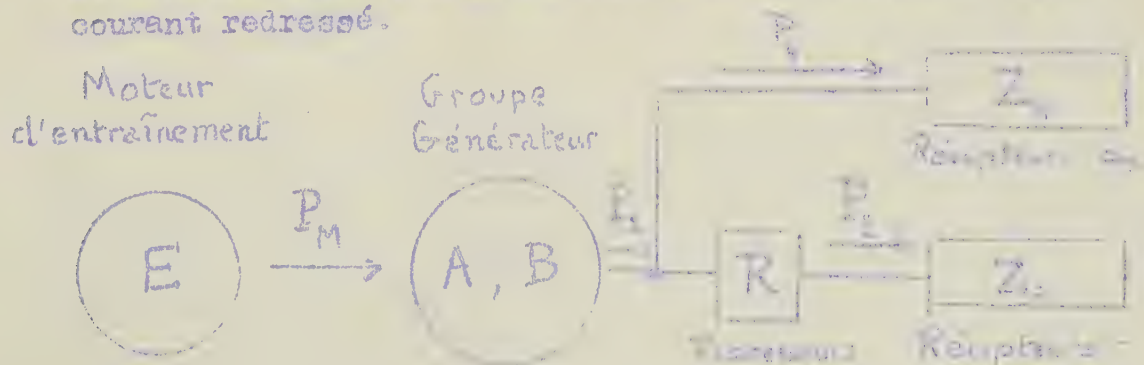
le circuit extérieur 2 est récepteur de puissance active. Le groupe fonctionne alors "en génératrice" vis à vis le récepteur 2 (puissance P_2 positive, puissance P_M positive).

Nous remarquerons, tout d'abord, que lorsque le groupe fonctionne "en simple génératrice à courant continu" (groupe équivalent à une génératrice à courant continu sans collecteur et sans balai), le sens de circulation de la puissance active P_2 est imposé par la présence du redresseur R, la puissance P_2 ne peut s'écouler que de la machine asynchrone vers le circuit récepteur.

η_R étant le rendement du redresseur, la puissance P_3 disponible à la sortie de celui-ci est :

$$P_3 = \eta_R P_2$$

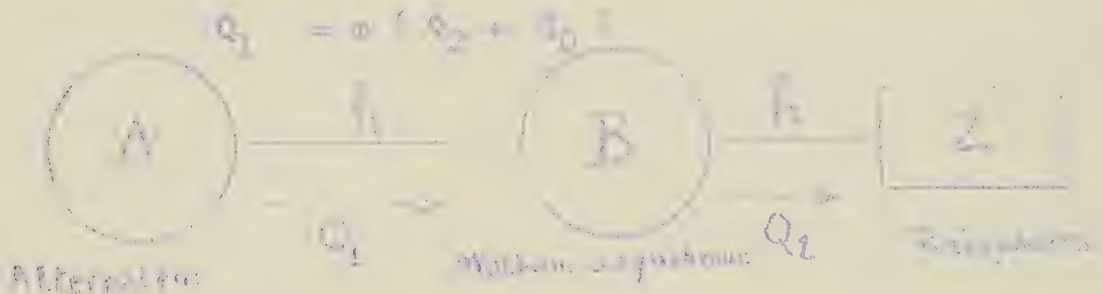
Il en est de même si l'on monte en dérivation aux bornes du stator de la machine B et, avant les redresseurs, des appareils de courant alternatif ayant un rôle exclusivement récepteur de puissance active (résistances, selfs ou moteurs) ou générateurs de puissance réactive (condensateurs). Le groupe fonctionne alors "en génératrice mixte à courant continu et à courant alternatif". La puissance active P_2 (toujours positive) est alors absorbée, en partie, par le circuit-récepteur Z_1 à courant alternatif et, en partie, par le circuit-récepteur Z_2 à courant redressé.



B) Sens de circulation des puissances réactives

Si le circuit extérieur Z_4 est récepteur de puissance réactive, la puissance Q_2 est positive (puissance fournie par la machine asynchrone), mais, cette puissance ne peut pas être fournie par Z_1 qui est un redresseur incapable de produire l'énergie réactive, elle provient donc uniquement de l'alternateur A .

On peut alors écrire, en valeur algébrique



Nous remarquerons que, la fréquence n'étant pas unique, il n'y a pas conservation des puissances réactives. En effet, la puissance réactive, si elle passe bien du primaire au secondaire de la machine asynchrone, est multipliée par le rapport m des fréquences.

Lorsque la puissance Q_2 est négative (moteurs aux bornes), la relation devient:

$$Q_1 = m Q_2 + Q_0$$

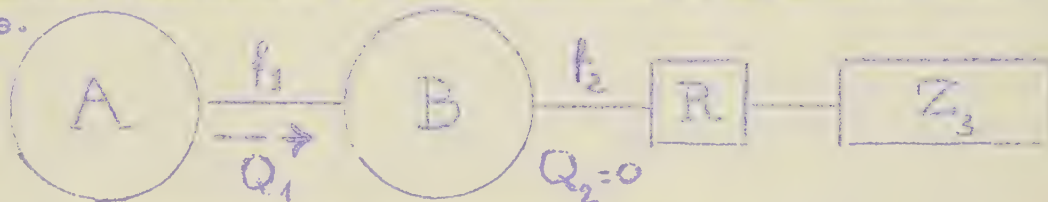
et, lorsque Q_2 est nulle (redresseurs aux bornes):

$$Q_1 = Q_0$$

Dans ce dernier cas, en exprimant Q_0 en fonction de la pulsation ω_1 , des courants produits par l'alternateur, m disparaît et on peut écrire (vu de l'alternateur):

$$Q_1 = \omega_1 \mathcal{L}_1 I_1^2 + \omega_1 \mathcal{L}_2 I_2^2 + 2 \omega_1 M I_1 I_2 \cos u$$

L'alternateur fournit, dans ces conditions, toute la puissance réactive nécessaire au fonctionnement de la machine asynchrone.



C) Sens de circulation des puissances actives.

Nous avons défini le sens de circulation des puissances P_M et P_2 ; il nous reste à examiner celui des puissances P_{MA} , P_{MB} et P_1 .

La discussion sur le signe de ces dernières puissances se ramène aux trois cas suivants :

<u>1^{er} Cas :</u>	P_{MB}	négatif	P_1	positif	P_{MA}	positif
<u>2^{er} Cas :</u>	P_{MB}	positif	P_1	positif	P_{MA}	positif
<u>3^{er} Cas :</u>	P_{MB}	positif	P_1	négatif	P_{MA}	négatif

Etude du 1^{er} cas :

La machine asynchrone est supposée développer un couple moteur $-C_B$ sur l'arbre commun. Dans ces conditions, la puissance active P_2 disponible aux bornes du groupe ne peut provenir que de l'alternateur A.

La puissance P_1 fournie par ce dernier se partage alors, en proportion variable, suivant la valeur du paramètre m , en puissance électrique P_2 fournie au récepteur Z et en puissance mécanique P_{MB} disponible sur l'arbre .

On a , en valeur arithmétique :

$$P_1 = P_{MB} + P_2 + (J_1 + J_2 + M_1)$$

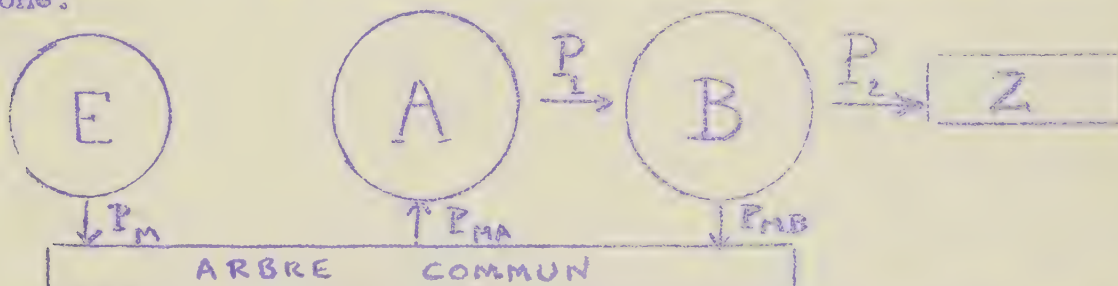
$$\text{avec } P_2 = \frac{P_1}{n} - \frac{J_1}{n} - J_2$$

Le signe positif de la puissance P_1 entraînant nécessairement le signe positif pour la puissance P_{MA} fournie à l'alternateur, on a les relations arithmétiques :

$$P_{MA} = P_1 + (J_A + M_A)$$

$$P_M = P_{MA} - P_{MB}$$

On voit que la puissance P_M du moteur d'entraînement est la différence arithmétique entre la puissance P_{MA} demandée par l'alternateur et la puissance P_{MB} fournie par la machine asynchrone.



La machine asynchrone remplit la fonction de "Transformateur dynamique de puissance" pour la partie P_2 et de "moteur" pour la partie P_{MB}

Dans son rôle de transformateur dynamique de puissance, elle transporte une puissance d'un bobinage mobile (le rotor) à un bobinage fixe (le stator) sans utiliser aucun contact frot-

tant.

Remarquons que si l'on néglige les pertes Joule J_1 et J_2 devant les puissances P_1 et P_2 , on a la relation approchée:

$$\frac{P_{MB}}{P_2} = \frac{P_1 - P_2}{P_2} = (m - 1)$$

qui montre que, si l'on veut éviter d'avoir un moteur asynchrone de trop grosse puissance, il faut choisir m assez voisin de l'unité.

Etude du 2° cas.

Par hypothèse, la machine asynchrone développe un couple résistant C_g sur l'arbre. Elle devient génératrice de puissance active et participe, elle-même, à la production d'énergie électrique du groupe.

L'alternateur peut, dans ces conditions, fonctionner "en générateur de puissance active" (alternateur) ou "en récepteur" (moteur).

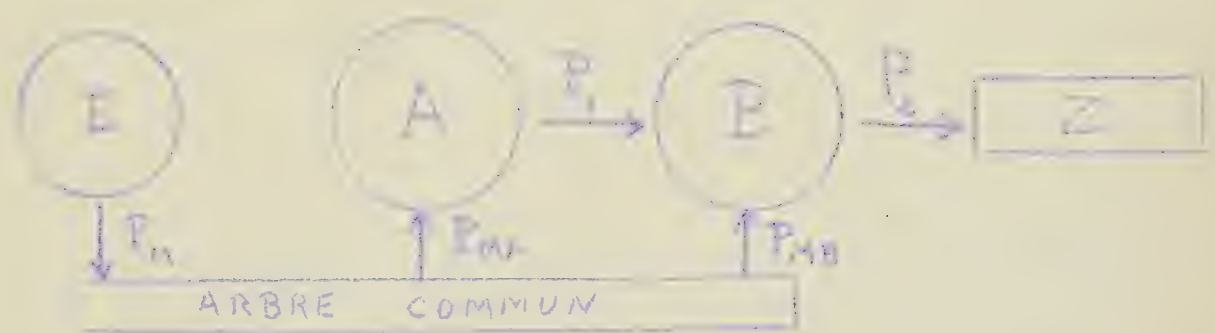
Limitons nous, pour l'instant, au fonctionnement "en alternateur": la puissance s'écoule de la machine A vers la machine B; la machine asynchrone joue le rôle de transformateur dynamique de puissance pour la partie P_1 et de génératrice pour la partie P_{MB} ; on peut écrire en valeur arithmétique :

$$\left[\begin{aligned} P_2 &= P_1 + P_{MB} - (J_1 + J_2 + M_D) \\ P_{MA} &= P_1 + (J_A + M_A) \end{aligned} \right]$$

$$P_V = P_{M1} + P_{M2}$$

$$\text{avec } P_V = \frac{P_E}{s} - \frac{P_C}{s} = J$$

La puissance P_{M1} du rotor d'entraînement est la somme des puissances P_{M2} et P_{M3} .



Etude du 3° cas.

La machine asynchrone réalise une double fonction électromécanique. Elle génère de puissance active vis à vis de la machine 1, elle est génératrice de puissance active à l'égard du circuit d'alimentation 2.

Autrement dit, la puissance P_{ME} prise sur l'arbre est transformée en puissance électrique P_1 disponible aux bornes de rotor et en puissance électrique P_2 disponible aux bornes du stator. On a, en valeur arithmétique:

$$P_{ME} = P_1 + P_2 + (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + R_0)$$

$$P_{ME} = P_1 + I_1^2 R_1 + R_0$$

$$P_M = P_{ME} - P_{P1}$$



La puissance P_M du moteur d'entraînement sera la différence entre la puissance P_{MB} fournie à la machine synchronisée et la puissance P_{MA} en provenance de la machine A.

Selon les conditions, et l'importance des pertes, on choisira de calculer la puissance P_M en tenant compte des pertes Joule dans les conducteurs P_1 et P_2 ou on a :

$$\frac{P_1}{P_2} = m$$

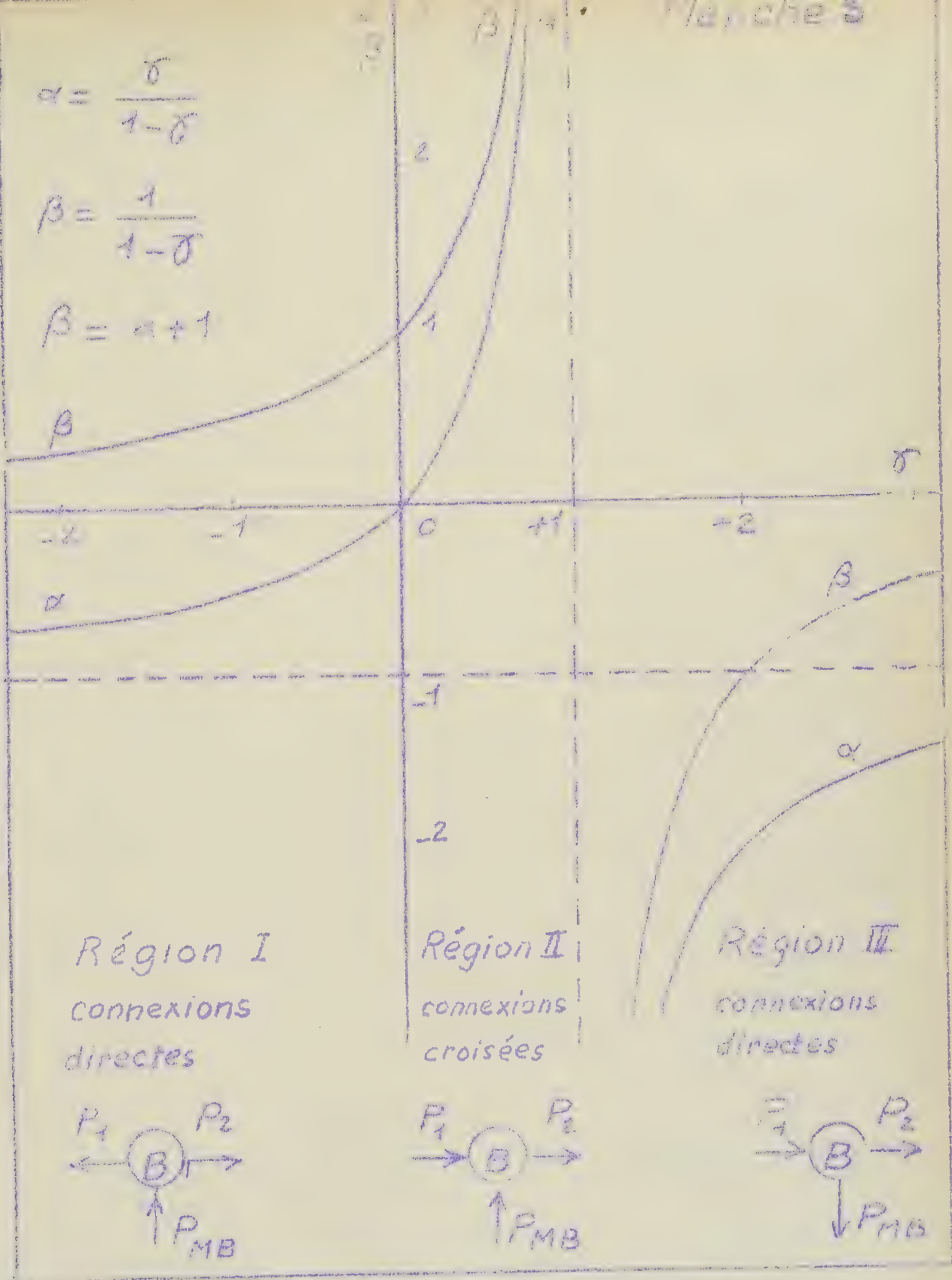
(à la limite $m \rightarrow 0$ conduirait à $P_1 \rightarrow 0$)

1.4.1. VALEURS COMPARATIVES DES PERTES P_1 , P_2 ET P_{MB}

En négligeant les pertes par effet Joule devant les puissances P_1 et P_2 , et en négligeant les pertes par effet Joule devant les pertes par effet Joule, on a :

On peut donc considérer que les pertes par effet Joule sont négligeables devant les pertes par effet Joule.

$$\begin{cases} P_1 = \gamma P_2 \\ P_2 = P_1 + P_{MB} \end{cases}$$



α : rapport des puissances P_1/P_{MB} en fonction de δ
 β : rapport des puissances P_2/P_{MB} en fonction de δ

Poseons :

$$\alpha = \frac{P_1}{P_{MB}}$$

$$\beta = \frac{P_2}{P_{MB}}$$

La transformation des relations ci-dessus permet d'exprimer α et β en fonction du paramètre γ :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{P_1}{P_{MB}} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \\ \beta &= \frac{P_2}{P_{MB}} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \end{aligned}$$

Ces équations très simples sont celles de deux hyperboles équilatères. Elles admettent toutes deux la droite $\gamma = 1$ comme asymptote verticale. L'hyperbole α représentant la valeur relative de P_1 par rapport à P_{MB} admet la droite $\alpha = -1$ comme asymptote horizontale, tandis que l'hyperbole β représentant la valeur relative de P_2 par rapport à P_{MB} admet l'axe des abscisses comme asymptote horizontale (Planche 5).

Avec la convention de signe adoptée au chapitre précédent pour le rapport q des nombres de pôles, on voit immédiatement que :

$$\alpha = q$$

Le rapport des puissances P_1 / P_{MB} est égal au rapport des nombres de pôles p_A / p_B

$$\frac{P_1}{P_{MB}} = \frac{p_A}{p_B}$$

De même, on constate que β n'est pas autre chose que l'inverse du rapport en des vitesses défini plus haut (chapitre 2, 1°):

$$\beta = \frac{1}{\alpha}$$

Autrement dit avec les conventions de signe adoptées pour les vitesses et les puissances, le rapport des puissances P_1/P_{MB} est égal au rapport des vitesses N_2/N_1 .

$$\frac{P_1}{P_{MB}} = \frac{N_2}{N_1}$$

Les relations algébriques ont été établies en négligeant les pertes dans la machine asynchrone. On peut donc prévoir que, lorsque les pertes de la machine asynchrone seront faibles vis à vis des puissances mises en jeu, la courbe $\alpha = f(\gamma)$, donnant la valeur relative de la puissance P_1 par rapport à la puissance mécanique P_{MB} aura l'allure de l'hyperbole:

$$\alpha = \frac{\gamma}{1-\gamma}$$

Plus les pertes seront faibles, plus les courbes tendront à se confondre.

De même la courbe $\beta = f(\gamma)$,

donnant la valeur relative de la puissance P_2 par rapport à la puissance mécanique P_{MB} aura la forme de l'hyperbole :

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1-\gamma}$$

Les courbes β et $1/n$ se superposeront exactement si les pertes de la machine asynchrone sont nulles (ceci, évidemment, est un cas limite).

Le tableau suivant à double entrée, établi avec les conventions de signe indiquées ci-dessous pour les rapports γ et α ainsi que pour les puissances, permet de préciser la forme de ces courbes:

	Conventions directes	Conventions croisées	Conventions directes	
γ	-1 -1/2 -1/3	+1/3 +1/2 +1/3	-3/2 -2 -3	α
$\alpha = \frac{P_1}{P_{MB}}$	-1/2 -1/3 -1/4	+1/2 +1 +2	-3 -2 -3/2	$\beta = \frac{P_2}{P_B}$
$\beta = \frac{P_2}{P_{MB}}$	+1/2 +2/3 +3/4	+3/2 +2 +3	-2 -1 -1/2	$\frac{1}{n} = \frac{N_1}{N_2}$

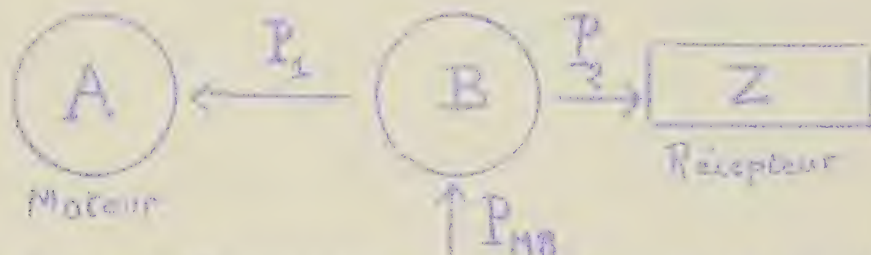
On voit, suivant les valeurs du paramètre γ , trois modes de fonctionnement correspondant à trois régions sur les courbes de puissance.

Le tableau qui suit indique précisément ces trois modes de fonctionnement et les trois régions:

	RÉGION I	RÉGION II	RÉGION III
γ	$\gamma < 0$	$0 < \gamma < 1$	$\gamma > 1$
n_2	$n_2 > n_3$	$n_1 < n_2 < n_3$	$n_2 < n_3$
P_2	Positif B fournit la puissance P_2 aux réducteurs B	Positif B fournit la puissance P_2 aux réducteurs B	Positif B fournit la puissance P_2 aux réducteurs B
P_1	Négatif B fournit la puissance P_1 à la machine A	Positif B reçoit la puissance P_1 en provenance de A	Positif B reçoit la puissance P_1 en provenance de A
P_{MB}	Négatif B reçoit la puissance P_{MB} en provenance du moteur d'entraînement E	Positif B reçoit la puissance P_{MB} en provenance du moteur d'entraînement E	Négatif B fournit la puissance P_{MB} à l'arbre
C	couple résistant	couple résistant	couple moteur

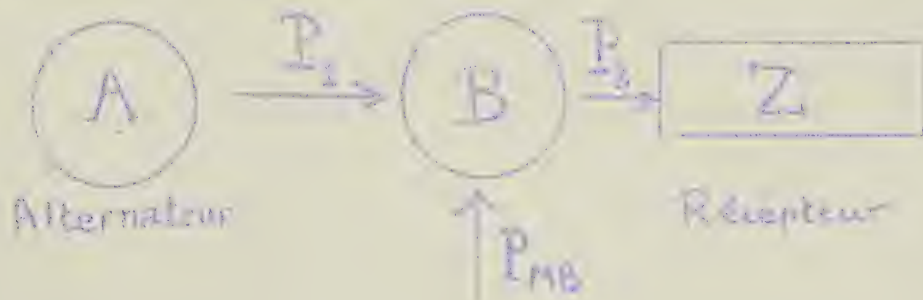
a) Dans la région I (Connexions directes $\gamma < 0$).

Les puissances P_1 et P_2 sont de signe contraire: la machine asynchrone est, à la fois, génératrice vis à vis de la machine A et vis à vis du circuit récepteur; la puissance P_1 est inférieure (en valeur absolue) à la puissance P_2 pour les valeurs de γ comprises entre -1 et 0. En rapprochant ces courbes de celles donnant la fréquence f_1 , on constate que, pour les mêmes valeurs de γ comprises entre -1 et 0, la fréquence f_1 est inférieure à la fréquence f_2 (faibles pertes dans le fer des rotors). Ces conclusions sont remarquables:



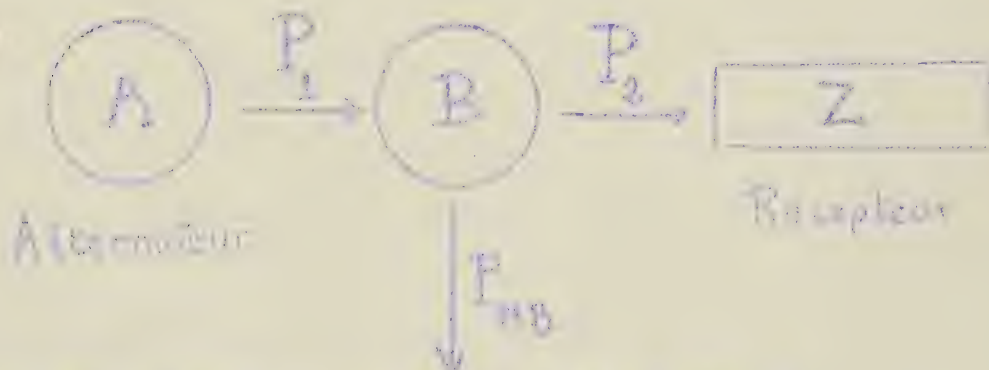
b) Dans la région II (Connexions croisées $0 < \gamma < 1$).

Les puissances P_1 , P_2 et P_{MB} sont positives: la machine asynchrone se comporte en transformateur pour la puissance P_1 et en génératrice pour la puissance P_{MB} ; la puissance P_1 est toujours inférieure à la puissance P_2 diagonnalisables aux bornes; la fréquence rotorique f_1 est également inférieure à la fréquence statorique f_2 . Ces conclusions sont également remarquables.



c) Dans la région III (Connexions directes $\gamma > 1$).

Les puissances P_1 et P_2 sont de signe contraire à la puissance mécanique $P_{MB} = P_2$ étant toujours positif, P_{MB} sera négatif. La machine asynchrone développe sur l'arbre un couple moteur la puissance P_1 fournie par l'alternateur est supérieure (en valeur absolue) à la puissance disponible aux bornes du groupe. La fréquence rotorique f_2 est, d'autre part, supérieure à f_1 . La région III est la moins intéressante.



Remarque: Cas limite: $\gamma = 0$ ($f_A = 0$)

Il est théoriquement possible de supprimer l'alternateur et de réduire le groupe générateur à une simple machine asynchrone débitant sur des redresseurs: l'amorçage serait réalisé par des condensateurs; un appareil du type "transducteur" pourrait assurer la régulation de tension; les redresseurs s'accommoderaient de fréquences variables. Ce groupe à cage d'écureuil ne comporterait aucun contact frottant (Condensateurs et redresseurs secs montés aux bornes du stator). Des désamorçages seraient cependant à craindre.

CHAPITRE 4

RÉSUMÉ DES DIFFÉRENTES FONCTIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE.

I.- Fonctionnement "en balai magnétique".

De même que les balais usuels transmettent "par contact" une puissance électrique d'un organe en rotation (les bagues collectrices) à un organe fixe (les balais), la machine B transmet "par induction" une puissance électrique d'un organe tournant (le rotor) à un organe fixe dans l'espace (le stator).

Dans ces conditions, on peut dire que le rotor de la machine B remplace les bagues collectrices et que son stator joue le rôle de "balai magnétique".

II.- Fonctionnement "en changeur de fréquence".

La machine B transforme la fréquence primaire f_1 des courants dans le rotor en une fréquence secondaire f_2 dans le

stator:

$$i_1 = \gamma i_2 \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{n_A}{n_A \pm n_B}$$

III.- Fonctionnement "en transformateur de tension".

a) A l'arrêt, la machine B se comporte comme un transformateur statique.

Si l'on applique une tension alternative V_2 aux bornes du bobinage du stator, on obtient la tension induite $V_{0,1}$ aux bornes du bobinage rotorique. En désignant par n_2 et n_1 les nombres de spires des bobinages statorique et rotorique, on a la relation du "transformateur statique":

$$V_{0,1} = \beta V_2 \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{k_1 n_1}{k_2 n_2}$$

β est le rapport de transformation des bobinages de la machine B, k_1 et k_2 les facteurs de bobinage.

b) Lorsque la machine tourne, la tension V_1 aux bornes du rotor devient:

$$V_1 = \gamma V_{0,1}$$

Les tensions primaire V_1 et secondaire V_2 sont alors liées par la relation du "transformateur dynamique":

$$V_1 = \gamma \cdot \beta \cdot V_2$$

L'identification de la machine B à un transformateur permet, de plus, de concevoir un "transformateur dynamique"

à prises multiples".

Ces prises disposées sur le bobinage secondaire permettent d'obtenir des tensions différentes aux bornes.

IV.- Fonctions de transformateur de couplage.

Vis à vis des redresseurs, la machine B joue le rôle de "transformateur de couplage".

Le montage des redresseurs se fait sur le circuit secondaire du "transformateur dynamique" de la même façon que sur le secondaire d'un "transformateur statique".

V.- Fonctionnement en transformateur de puissance.

Lorsque le paramètre γ est positif, la machine B est analogue à un transformateur dont le circuit magnétique comporterait un entrefer.

a) A l'arrêt, si l'on alimente en courant polyphasé l'un des bobinages de la machine B, les puissances P_1 et P_2 aux bornes des bobinages primaire et secondaire sont liées par la relation:

$$P_1 = P_2 \quad (\text{aux pertes près})$$

La machine B se comporte alors comme un transformateur statique.

b) A la vitesse N_E , la machine B constitue "un transformateur dynamique" dont le fonctionnement assez particulier est déterminé par la valeur du paramètre γ :

$$P_1 = \gamma P_2 \quad (\text{aux pertes près})$$

VI. - Fonctionnement "en génératrice" (ou "en moteur")

Lorsque le paramètre γ est positif, la machine asynchrone fonctionne (aux pertes près):

- "en transformateur de puissance" pour la fraction γ de la puissance P_2 disponible aux bornes ;
- "en génératrice" (ou "en moteur") pour la fraction $(1 - \gamma)$ de cette puissance P_2 .

Dans son fonctionnement "en transformateur de puissance", elle transforme une puissance électrique rotorique en une puissance électrique statorique; dans son fonctionnement "en génératrice", elle transforme une puissance mécanique en une puissance électrique statorique.

1° Cas particulier: à l'arrêt, $N_E = 0$ $\gamma = 1$

$$\begin{cases} P_1 = P_2, \text{ fonctionnement en simple "transformateur"} \\ P_{MB} = 0 \end{cases}$$

2° Cas particulier: $N_E = \frac{N_{BS}}{2}$ $\gamma = 1/2$

$$\begin{cases} P_1 = 1/2 P_2 & \text{Fonctionnement par moitié "en transformateur"} \\ P_{MB} = 1/2 P_2 & \text{do "en génératrice"} \end{cases}$$

Par contre, lorsque le paramètre γ devient négatif, la machine asynchrone ne joue plus le rôle de transformateur de puissance, mais, nous l'avons vu, elle travaille doublement "en génératrice":

- vis à vis du circuit d'utilisation, pour la fraction $\frac{1}{1 - \gamma}$ de la puissance P_{MB} prise sur l'arbre (aux pertes près)
- vis à vis de la machine A, pour la fraction $\frac{\gamma}{1 - \gamma}$ de cette même puissance P_{MB} (aux pertes près).

APPENDICE

PARTIE EXPERIMENTALE

2. - MACHINES UTILISEES

Il était difficile de trouver des machines suffisamment simples pour explorer les trois régions définies par les valeurs de ω définites 2°.

Les essais ont été réalisés avec des appareils de forme simple dont nous avons défini nous-mêmes les caractéristiques propres dans les différents cas expérimentaux. Il est déterminé les limites d'essai dans une certaine mesure.

Machine synchronisme : 1000 W, 50 Hz triphasé

— 1000 W —

Cette machine a été utilisée sous des tensions réduites (tensions sur borne au point d'équilibre (déclatés à 100 V)).

Dans ces conditions, la courbe de rendement passe par un maximum vers 1500 à 2000 watts et décroît rapidement pour les puissances supérieures.

- Alternateur : 2,5 KVA 1 500 t/min 50 Hz (2 paires de pôles) triphasé 110 v/190 v 15 ampères
Excitation : 125 v 2,5 amp. (inducteurs fixes).

- Alternateur : 1,5 KVA 1 500 t/min 25 Hz (1 paire de pôles) et 50 Hz (2 paires de pôles) triphasé 120 v/210 v 7 amp.
Excitation: 120 v 5 à 6 amp. (inducteurs fixes).
Utilisé à vitesse réduite (800 t/min), cet alternateur a pu donner, dans les meilleures conditions, 1 000 watts sous 75 volts.

- Moteur à courant continu: 6 KW 1 400 t/min 125 volts entraînant par courroie la machine asynchrone et l'alternateur 2,5 KVA.

Moteur à courant continu 6 KW 1 500 t/min 125 volts
Accouplé directement à l'alternateur 1,5 KVA

- Transformateur: 7 KVA triphasé

Primaire Δ Δ 220 v/115 v

Secondaire Δ Δ 380 v/220 v

- Redresseurs

Ne disposant pas de redresseurs au silicium de puissance suffisante, nous avons fait nos essais avec des redresseurs au sélénium (Rendement inférieur).

- Groupe redresseur 3,5 KW, constitué par des cellules au sélénium montées en pont triphasé (redressement des deux alternances).

Alimentation sous tension alternative.

130 v entre phases, 20 amp. par phase.

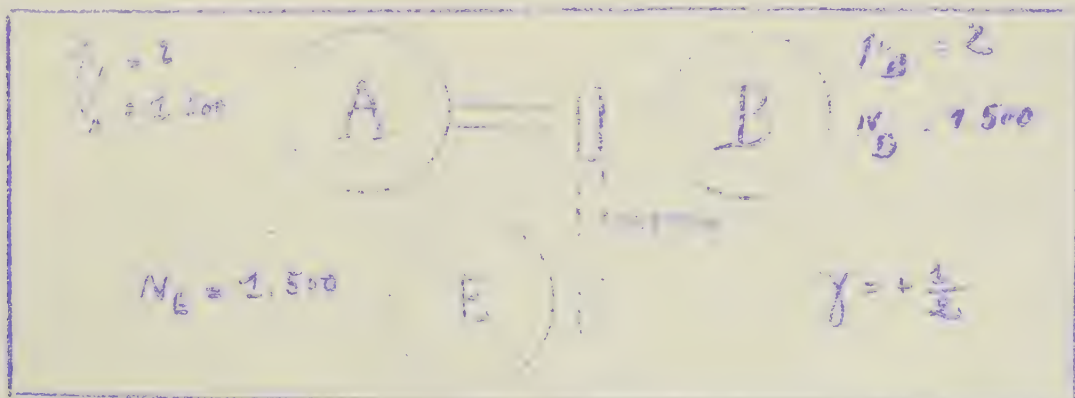
Sortie courant redressé : 145 volts 25 ampères.

De façon à réaliser les rapports de vitesses, de puissances et de tensions désirés, nous avons utilisé le matériel précédent sous charge réduite. Les rendements correspondants, encore acceptables, nous ont conduit à des résultats suffisamment précis pour nous permettre d'en tirer des conclusions valables.

B. - MONTAGES UTILISÉS.

Premier Montage d'étude:

L'alternateur A, de 2,5 KVA, et la machine asynchrone B, montés sur le même arbre, sont entraînés par le moteur E à la vitesse $N_E = 1\ 500$ t/min. Les machines A et B n'ayant qu'un seul bout d'arbre sorti, nous avons utilisé une transmission par courroie:



Les machines A et B ayant le même nombre de pôles et la même vitesse, le paramètre γ est alors égal à $+1/2$.

Ce montage nous a servi à établir les caractéristiques à vide et en charge dans des conditions semblables aux réalisations pratiques. Il nous a permis, en particulier, d'étudier les conditions d'amorçage et d'autoexcitation du groupe, ses possibilités de couplage et sa stabilité dans son fonctionnement "en génératrice SHUNT".

Deuxième montage d'étude/:

Le montage précédent manque de souplesse pour l'étude des différentes valeurs du paramètre γ , en raison de la difficulté de faire varier le nombre de pôles p_A et p_B des machines A et B.

On a donc cherché à recourir à un artifice permettant de jouer sur le rapport des vitesses N_A/N_B des deux machines.

Cet artifice nous a permis de faire varier d'une façon continue et dans de larges limites, le rapport:

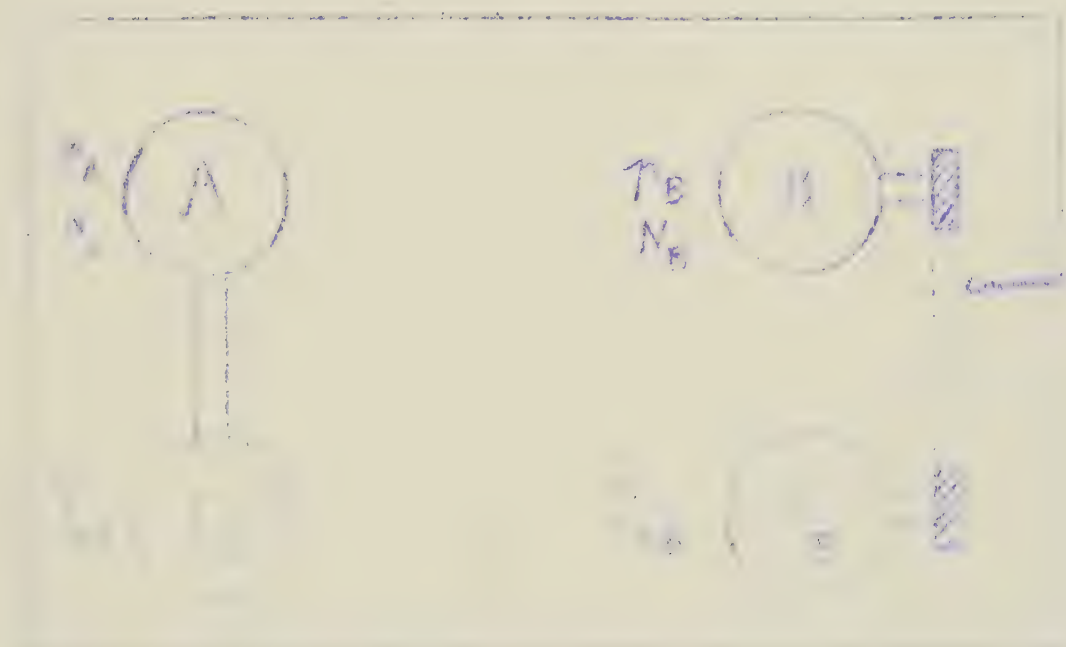
$$q = \frac{N_A p_A}{N_B p_B}$$

La relation fixant la valeur du paramètre γ s'écrit alors:

$$\gamma = \frac{N_A p_A}{N_A p_A \pm N_B p_B}$$

Le signe + correspondant aux "connexions croisées" et le signe - aux "connexions directes".

les deux machines sont alors homocouplées et entraînées chacune par un moteur distinct, E_A pour la machine A, E_B pour la machine B :

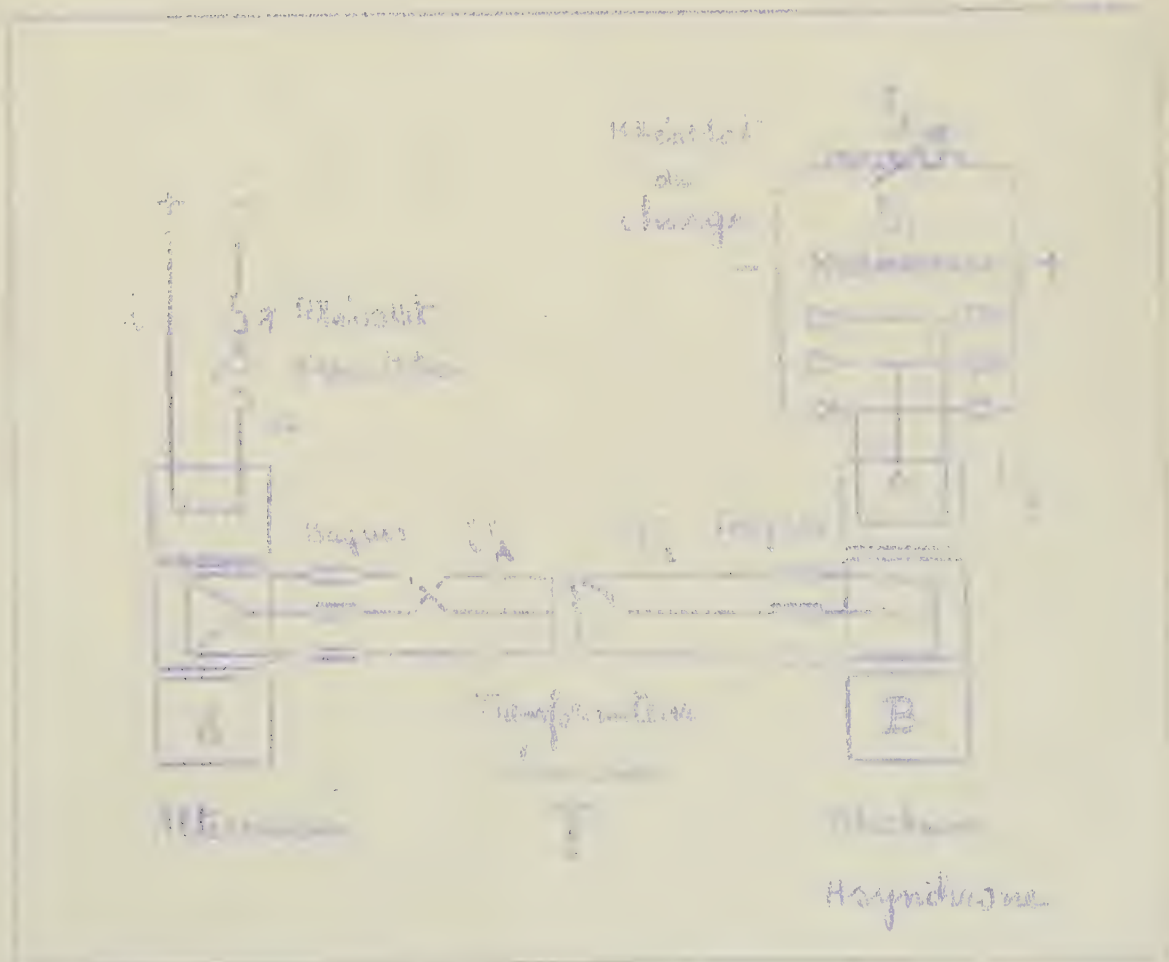


Ce montage présente, de plus, l'avantage de séparer les puissances mécaniques P_{MA} et P_{MB} fournies aux deux machines.

Nous avons utilisé, dans ce cas, l'alternateur
à six pôles à une paire de pôles et à deux paires de pôles.

Les essais conduits pour les deux machines A et B entre
les vitesses 500 1/min et 1 500 1/min ont permis d'établir
les courbes de rendement et les possibilités de réglage de vitesse
ainsi que les échanges de puissance pour les différentes
valeurs du paramètre γ .

Diagramme électrotechnique pour les essais



SCHEMA D'IMPLANTATION DES APPAREILS DANS LE

LABORATOIRE D'ESSAIS

TABLEAU PORTANT LES APPAREILS DE MESURE (Ampèremètres,
Voltmètres, Wattmètres):

Table (1)	Circuit des rotors
Table (2)	Stator de la machine asynchrone
Table (3)	Circuit des redresseurs avec les rhéostats de charge
Table (4)	Excitation de l'alternateur
Table (5)	Alimentation du moteur d'entraînement.

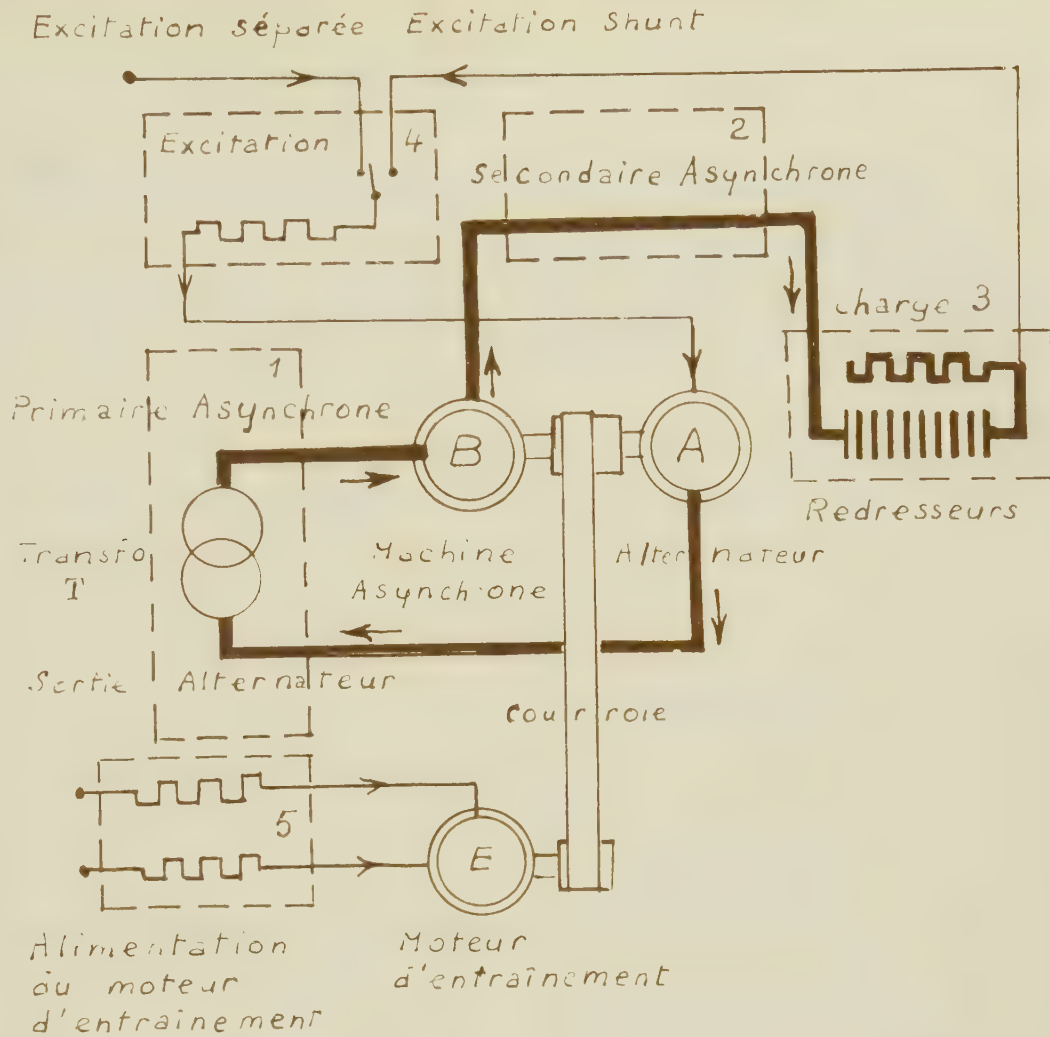


Schéma d'implantation des
appareils dans le laboratoire d'essai

D.- Tracé des caractéristiques à excitation séparée:

Nous nous proposons de montrer que le groupe "machine asynchrone-relais-charge" piloté par un alternateur est équivalent à une génératrice à courant continu.

Pour ce faire, nous allons tracer les caractéristiques classiques de la machine à courant continu à excitation séparée et à excitation séparée pour différentes valeurs du paramètre γ .

- 1) Caractéristique à vide:

$$E = f(i)$$

$$N = \text{Constante}$$

- 2) Caractéristique en charge:

$$U = f(i)$$

$$N = \text{Constante}$$

$$i = \text{Constante}$$

- 3) Caractéristique de réglage :

$$I = f(i)$$

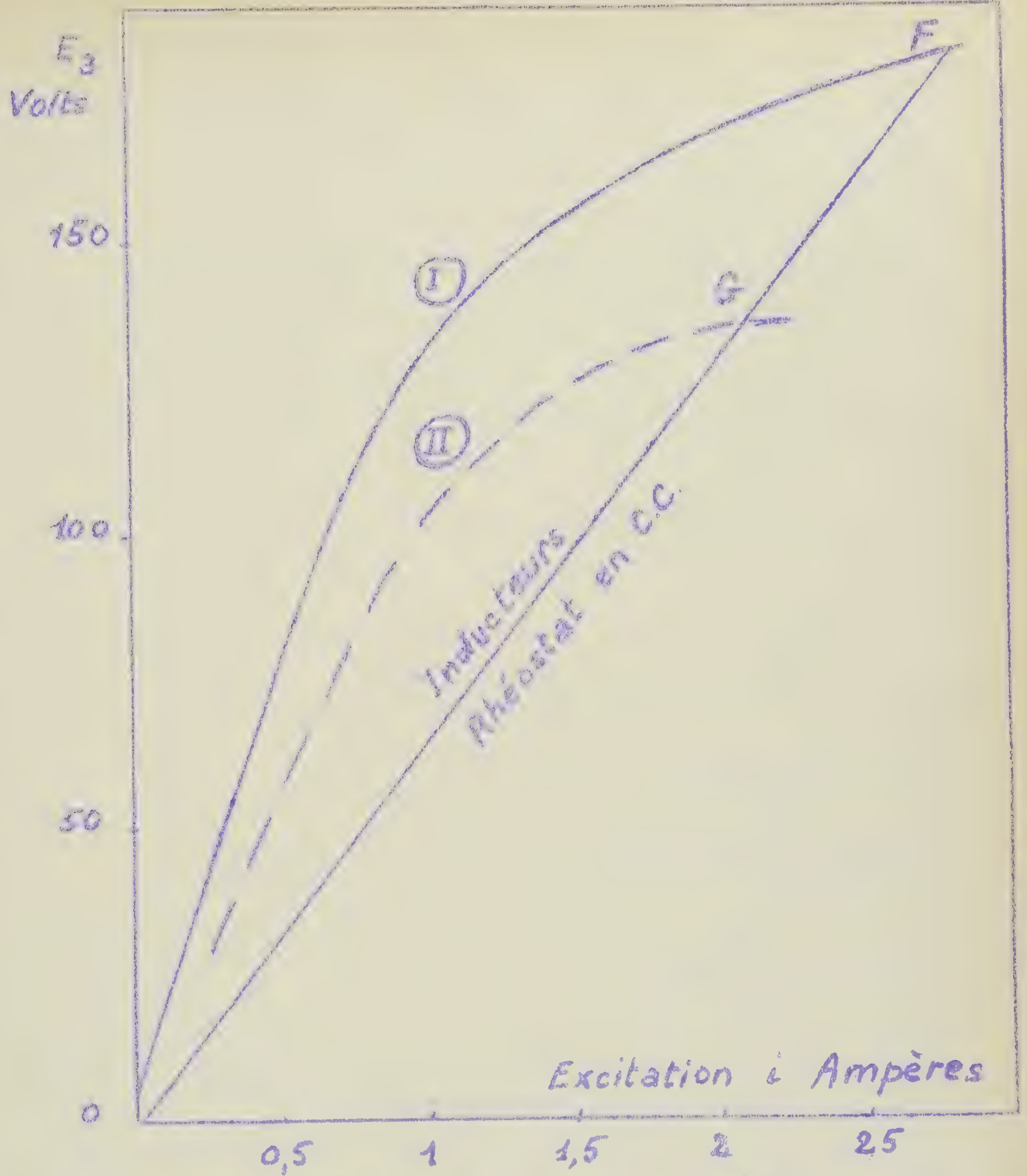
$$N = \text{Constante}$$

$$U = \text{Constante}$$

1) Courbe à vide

La courbe à vide du groupe $E_3 = f(i)$ est donnée par la relation $E_3 = f(i)$ à la sortie des relais en fonction du courant d'excitation i de l'alternateur.

Les caractéristiques constructives des machines et les rapports de tension entre les différents éléments du groupe doivent conduire à une courbe à vide E_3 présentant un coude prononcé un peu avant le point de fonctionnement F , de façon à avoir une tension stable aux bornes.



Courbes à vide $N=1500 \text{ t/m}$ $\delta = +\frac{1}{2}$

- ① Courbe $E_3=f(i)$ du groupe avec $U_A/U_1=1,9\sqrt{3}$
- ② Courbe $E_3=f(i)$ du groupe avec $U_A/U_1=4$

Avec l'alternateur de 2,5 KVA et la machine asynchrone dont nous disposons nous avons, pour ce faire, (voir, entre les deux rotors un transformateur adapté de tension (Voir les caractéristiques ci-dessus) pour le rapport de tension $U_A/U_1 = 1,9\sqrt{3}$, la courbe à vide (I) coupe la droite des inducteurs à $i = 0$ au point E , de coordonnées 180 volts, 2,8 ampères. (Planche 6)

U_A tension aux bornes de l'alternateur (indice A)

U_1 tension aux bornes de la machine asynchrone (indice 1, car il s'agit du primaire)

i et u intensité et tension aux bornes des inducteurs de l'alternateur (lettres minuscules).

	Alternateur 2,5 KVA							$\gamma = +1/2$	$N = 1\ 500\ \text{r/min}$
i ampères	0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7		
E volts	46	103	136	153	165	172	179		

En ajoutant un transformateur supplémentaire de façon à avoir un rapport de tension $U_A/U_1 = 4$, la courbe à vide du groupe viendrait en (II); le point de fonctionnement serait en G (135 volts , 2,1 ampères)

	alternateur 3 KVA				$\gamma = + 1'2$	$n = 1\ 500\ \text{t/min}$	
I_2 ampères	0,7	0,8	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1
U_2 volts	45	85	85	114	124	111	135

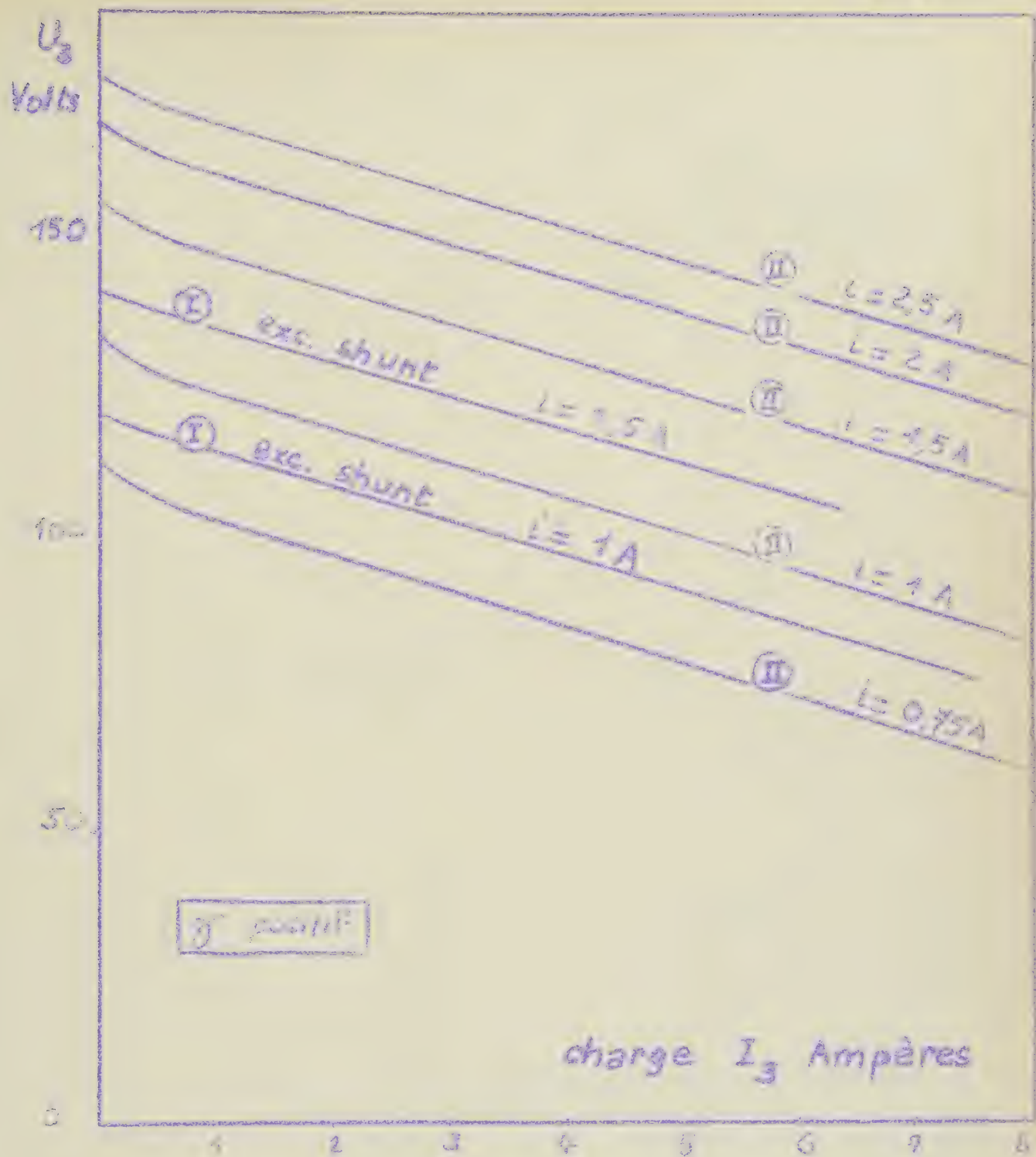
Les courbes se relèvent comme d'habitude: le circuit excité étant ouvert, on fait croître le courant inducteur de zéro à une valeur maximale, puis on le fait décroître progressivement la même valeur à zéro, en vérifiant que la vitesse reste égale à 1 500 t/min.

Une courbe à vide convenablement coulée est nécessaire pour éviter des surtensions préjudiciables aux redresseurs.

Les essais qui vont suivre correspondent à la première courbe à vide réalisée avec le rapport $U_A/U_1 = 1,93$

2) Caractéristiques en charge $U_3 = f(I_2)$

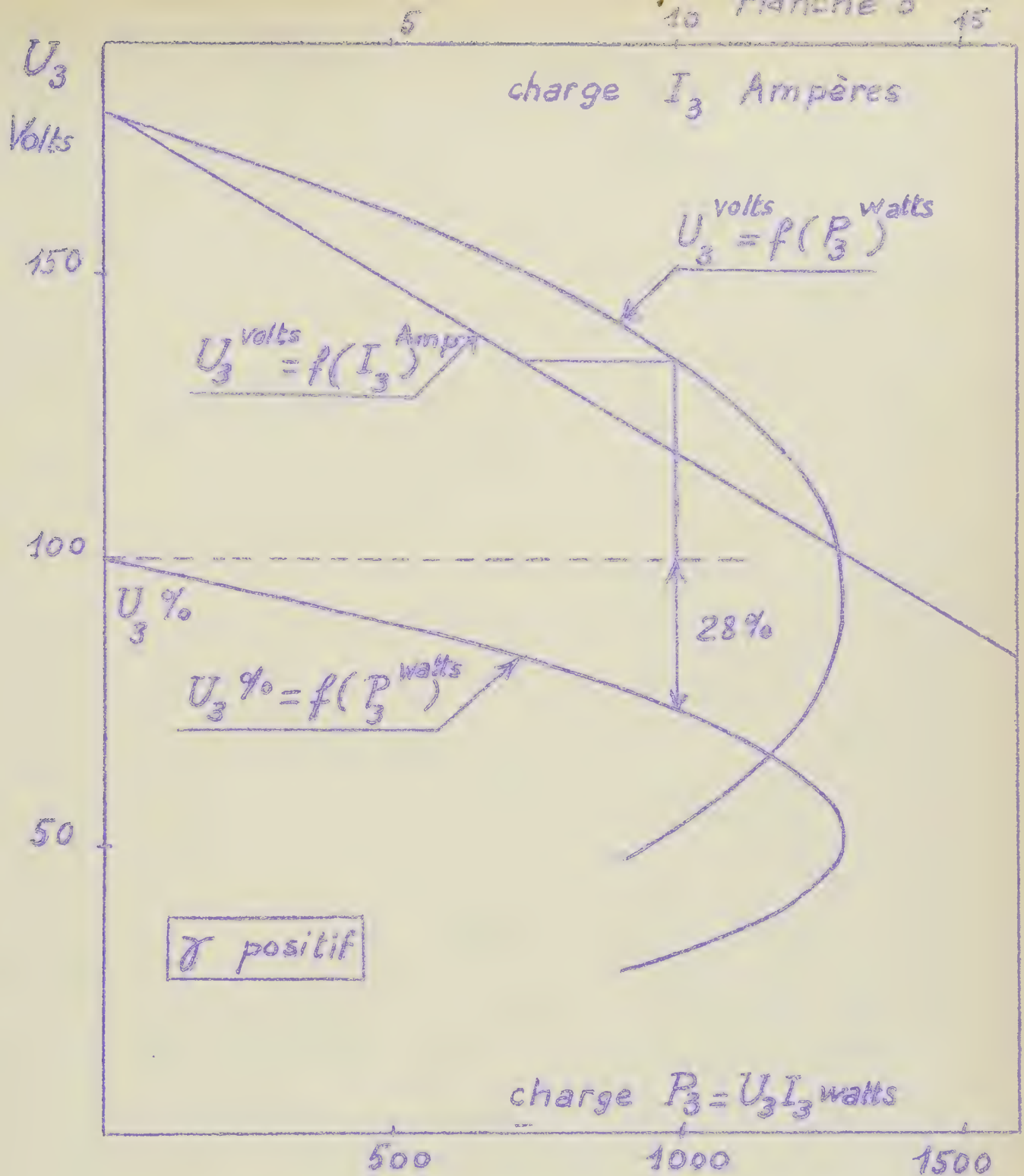
A l'aide d'un rhéostat de charge sur le circuit d'utilisation, on a fait varier le courant I_2 débité par les redresseurs et on a mesuré la tension U_3 aux bornes de ces derniers, l'excitation i et la vitesse n du groupe étant maintenues constantes.



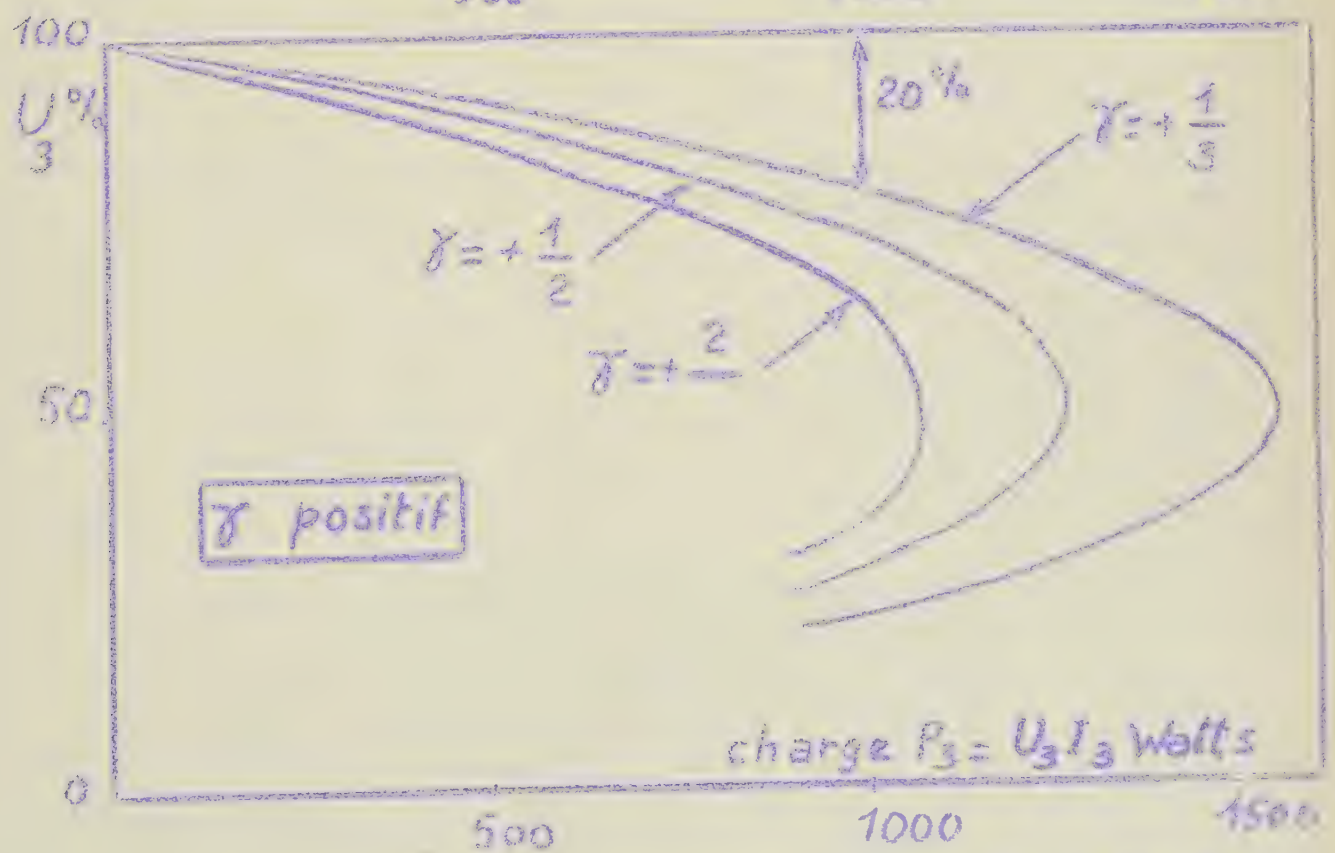
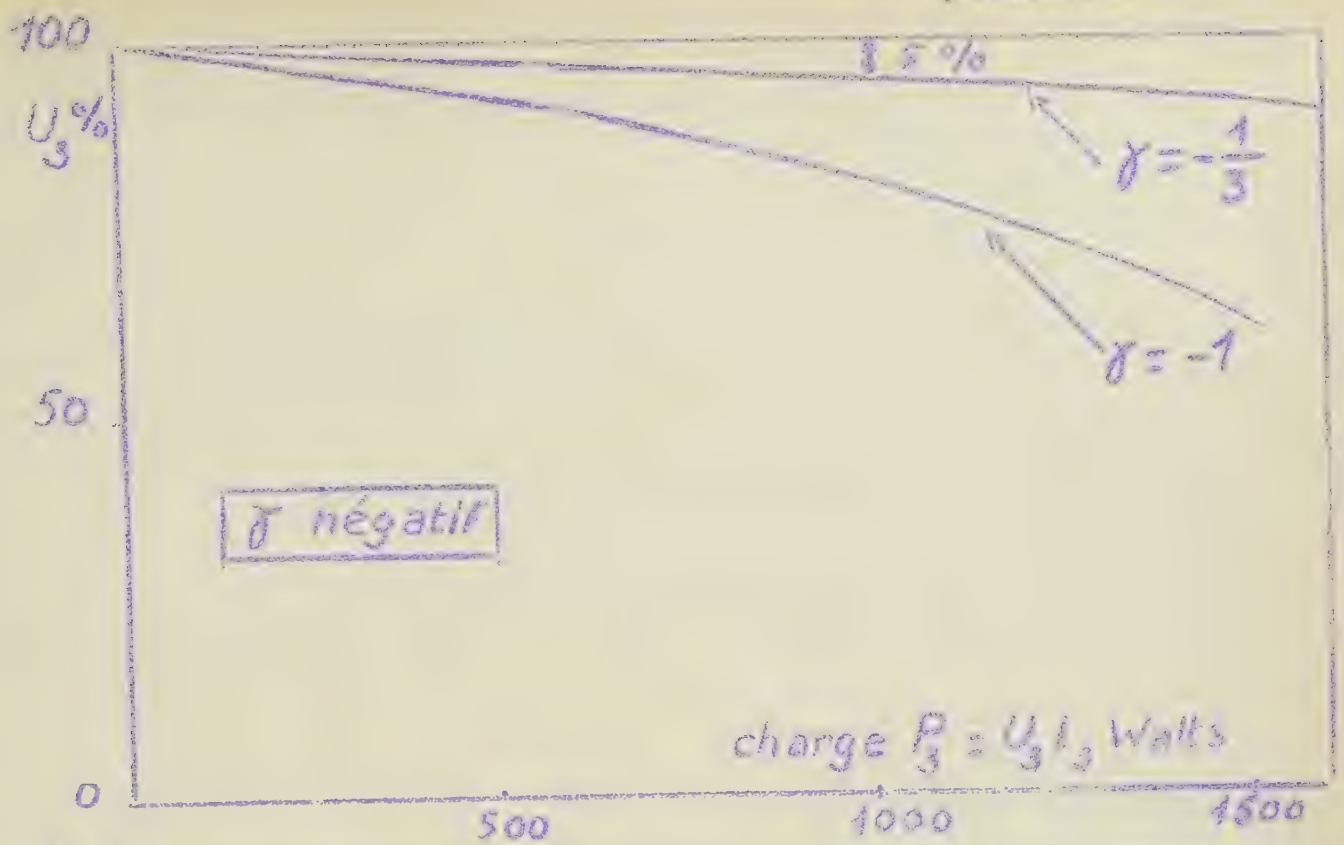
Caractéristiques en charge $N = 1500 \frac{r}{m}$ $\sigma = +\frac{1}{2}$

(I) a autoexcitation SHUNT

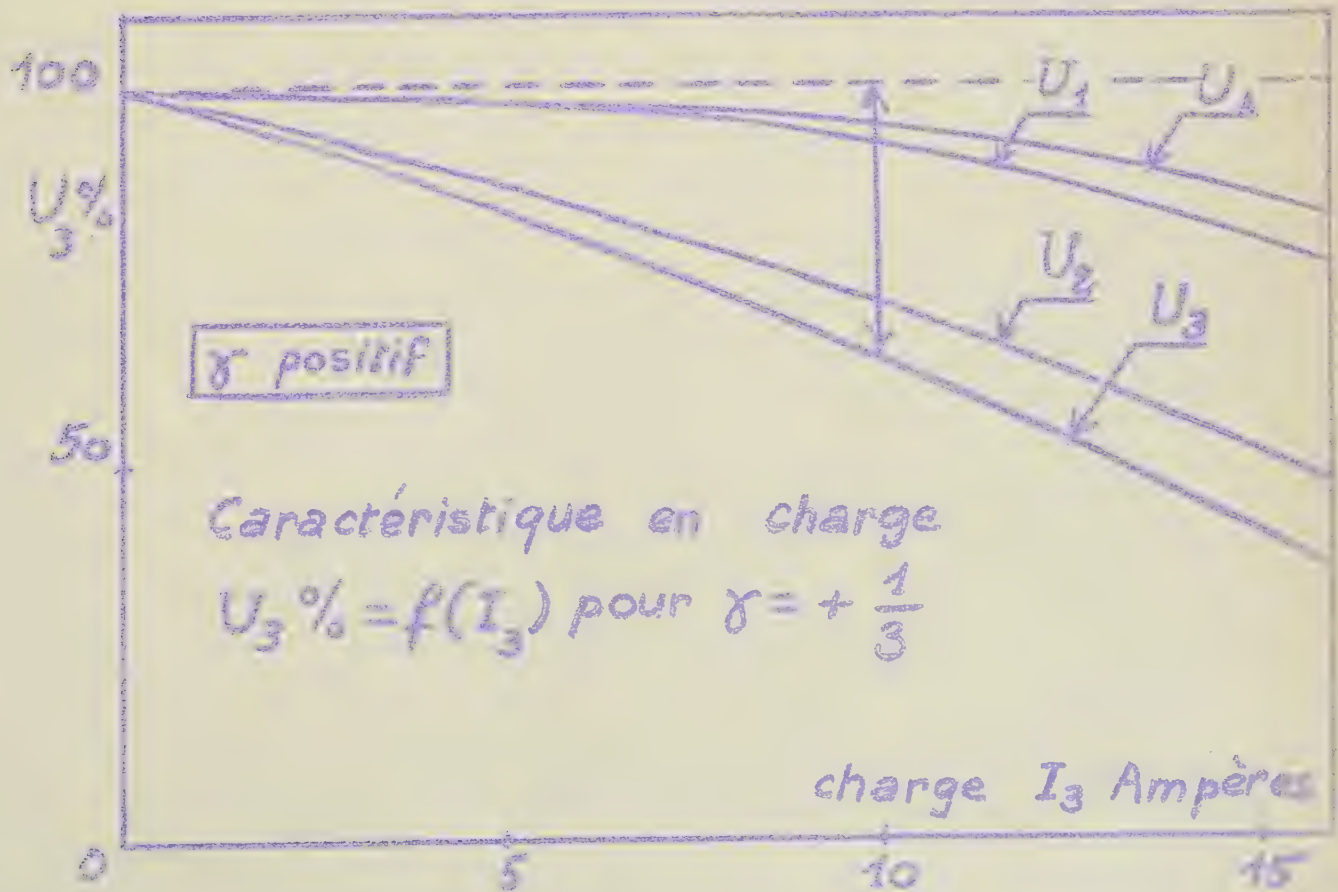
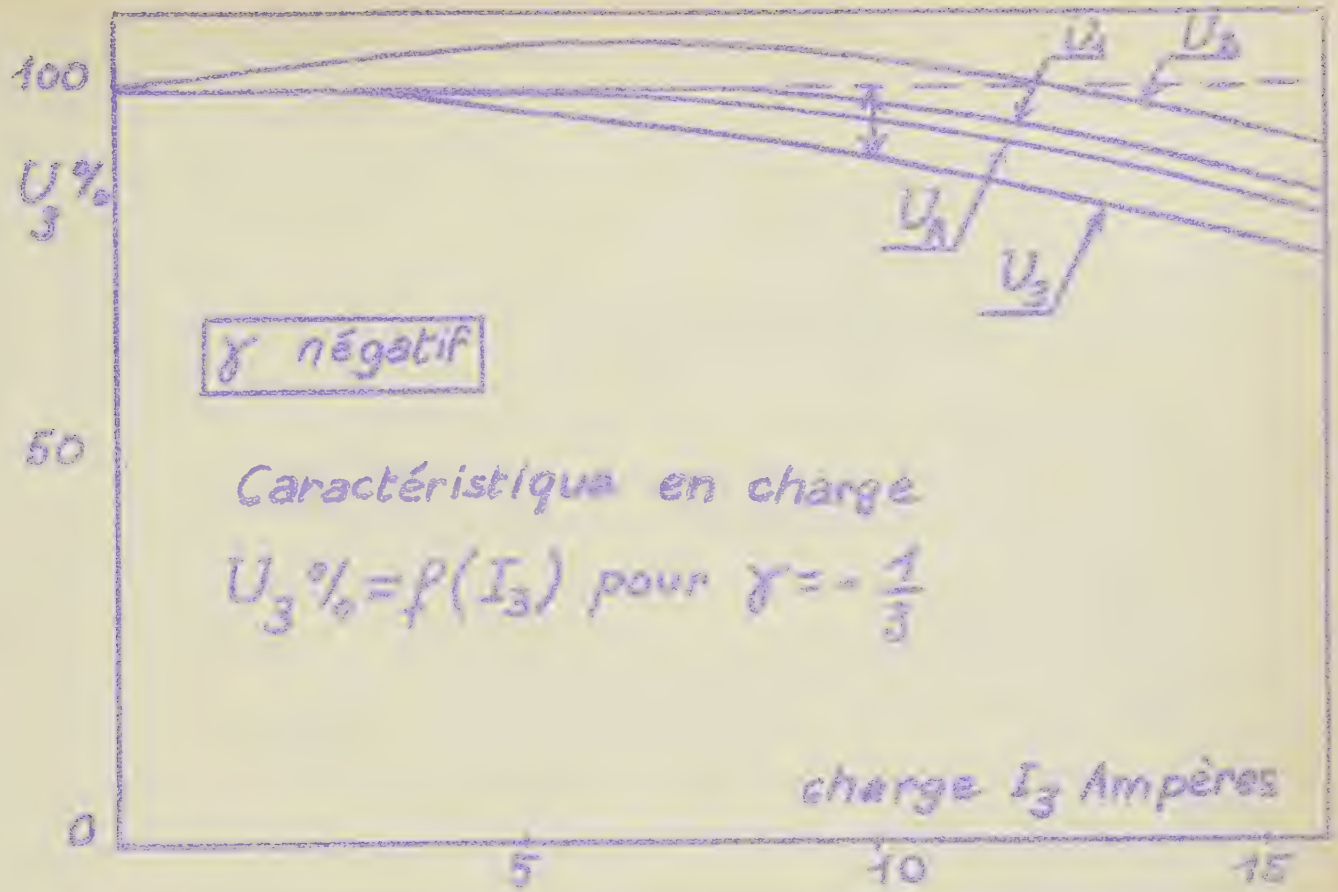
(II) a excitation SÉPARÉE



Caractéristique en charge $N = 1500 \text{ } \frac{\text{V}}{\text{m}}$ $\gamma = +\frac{1}{2}$
 excitation séparée $i = 2,5$ Ampères
 U_3 volts et $U_3 \%$ rapporté à la tension à vide



Caractéristiques en charge $U_3\% = f(P_3)$



a) Tracé des courbes pour les valeurs positives
du paramètre χ

$$\chi = + 1/2$$

L'alternateur 2,5 KVA, monté sur l'arbre de la machine asynchrone et tournant à la vitesse de 1 500 t/min, est excité successivement à 0,75 ampère, 1 ampère, 1,5 ampère, 2 ampères et 2,5 ampères. On obtient un réseau de courbes sensiblement rectilignes et parallèles entre elles (très léger décrochement à vide correspondant à une faible surtension qu'on retrouve sur les caractéristiques propres des redresseurs). (Planche 7)

Sur la planche suivante, la caractéristique $i = 2,5$ ampères a été tracée en fonction de la puissance fournie par les redresseurs P_{red} . On a exprimé la tension en volts (courbe du haut) et en pour cent de la tension à vide (courbe du bas). On constate une chute de tension

$$\frac{U_{3,0} - U_3}{U_{3,0}} = 28 \text{ pour cent}$$

pour une charge de 1 000 watts correspondant à $i_3 = 7,2$ ampères et $U_3 = 134$ volts (Planche 8).

Alternateur 2,5 KVA $\gamma = +1/2$ $N = 1\ 500$ t/m							
I_a ampères	0	4,5	5	7,5	10	12,5	14,5
U_a volts	177	163	148	134	118	102	90
P_a watts	0	410	745	1 215	1 180	1 275	1 100

Les mêmes essais, repris avec l'alternateur 1,5 KVA, conduisent, pour la même valeur du paramètre γ et pour l'excitation maximum correspondante, aux mêmes chutes de tension et à la même puissance maximum de 1 300 watts.

$$\gamma = +1/3, +1/2, +2/3$$

Sur la planche 1 sont représentées les chutes de tension en pour cent de la tension à vide pour différentes valeurs du paramètre γ .

Ces caractéristiques ont été obtenues en utilisant l'alternateur 1,5 KVA entraîné par un moteur séparé.

	$\gamma = + 2/3$	$\gamma = + 1/2$	$\gamma = + 1/3$
Machine A : (Alternat. 1,5 MVA)	$P_A = 4$ $N_A = 1\ 700\ \text{t/min}$ $i = 5\ \text{ampères}$	$P_A = 2$ $N_A = 1\ 500\ \text{t/min}$ $i = 6\ \text{ampères}$	$P_A = 1$ $N_A = 1\ 500\ \text{t/min}$ $i = 5,5\ \text{amp.}$
Machine B :	$P_B = 2$ $N_B = 1\ 500\ \text{t/min}$ couplage $\Delta \Delta$	$P_B = 2$ $N_B = 1\ 500\ \text{t/min}$ couplage $\Delta \Delta$	$P_B = 2$ $N_B = 1\ 500\ \text{t/min}$ couplage $\Delta \Delta$
Transfo. T:	couplage $\Delta \Delta$ $U_A/U_1 = 1,9$	couplage $\Delta \Delta$ $U_A/U_1 = 1,9\sqrt{3}$	couplage $\Delta \Delta$ $U_A/U_1 = 1,9\sqrt{3}$

Tant que γ reste positif, les chutes de tension en charge sont relativement importantes :

Pour 1 000 watts :	$\gamma = + 2/3$	$\gamma = + 1/2$	$\gamma = + 1/3$
$\frac{U_{0,3} - U_3}{U_{0,3}} =$	35 %	28 %	20 %

Ces résultats s'expliquent par la présence de la machine asynchrone dont le rotor est monté en cascade sur le rotor de l'alternateur. Lorsque $0 < \gamma < 1$, les deux machines sont "en série", la chute de tension de la machine.

asynchrone s'ajoute à la chute de tension de l'alternateur. (Planche 10).

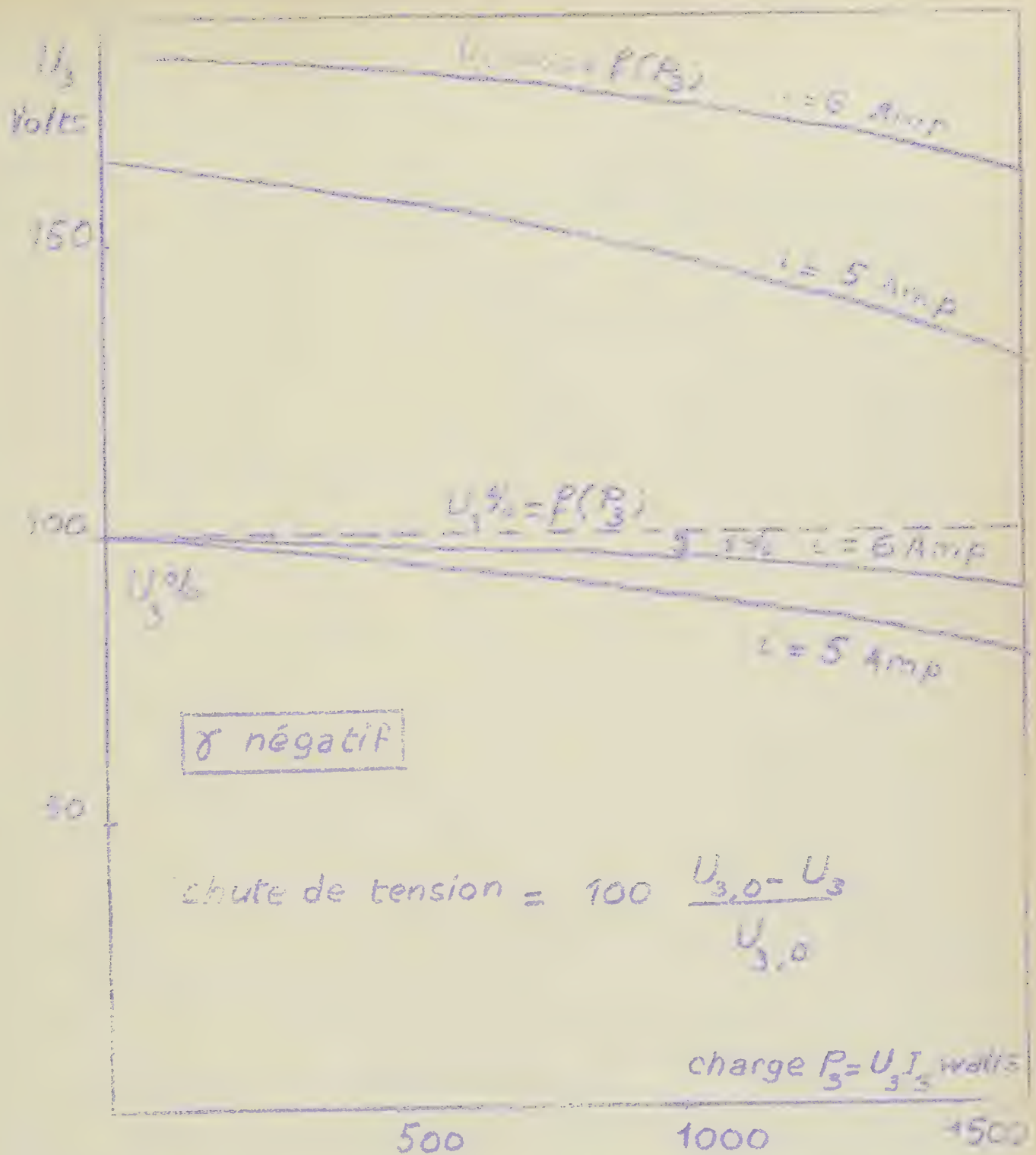
On pourrait atténuer ces chutes de tension en saturant les circuits magnétiques, en agissant sur le facteur de puissance, en prévoyant un compoundage judicieux de l'alternateur et en réduisant, si possible, les flux de fuite.

Or, nous avons la chance de pouvoir diminuer, précisément ici, les flux de fuite, grâce au montage en cascade des deux machines. Nous avons montré, en effet, que le nombre de pôles $2p$ de la machine unique équivalente au groupe (dans le cas $0 < \gamma < 1$) était égal à la somme des pôles $2p_A$ et $2p_B$ des deux machines A et B. Chaque machine du groupe aura, dans ces conditions, un nombre de pôles inférieur à celui de la génératrice simple équivalente, de type normal. Par conséquent, à diamètre égal, le groupe pourra avoir un pas polaire plus grand que celui de la génératrice normale. D'où, possibilité d'augmenter le nombre d'enchoches par pôle et de mieux répartir les conducteurs dans les rainures, ce qui réduira les réactances de fuites. Le couplage entre stator et rotor sera plus serré, le coefficient de dispersion sera plus faible, la chute de tension sera plus réduite (entrefer lisse).

- b) Pour les valeurs négatives du paramètre γ , les circonstances deviennent vraiment exceptionnelles on a constaté des chutes de tension très faibles.

$$\gamma = -0,29$$

Chute de tension de 6 volts pour $I_s = 15,5$ ampères, soit une chute de 4,5 % pour 1 000 watts (Planche 11).



Caractéristiques en charge pour $\gamma = -0,29$
 excitation $L = 5$ Ampères et 6 Ampères
 U_3 volts et $U_3\%$ rapporté à la tension à vide

Ce résultat tout-à-fait remarquable correspond à un fonctionnement particulier de la machine asynchrone: nous avons montré que pour γ négatif, la machine asynchrone est, à la fois, génératrice de puissance active vis à vis des redresseurs et vis à vis de l'alternateur. Dans ces conditions, la puissance active circule de la machine asynchrone vers les redresseurs, d'un côté, de la machine asynchrone vers l'alternateur, de l'autre côté (Alternateur fonctionnant comme moteur). Les machines ne sont plus "en série", les câbles de tension ne s'échauffent plus. (Planche 10).

$$\gamma = -1/3 \quad \gamma = 1$$

Le mode opératoire est le même que celui adopté précédemment :

	$\gamma = -1/3$ et $-0,25$	$\gamma = -1$
Machine A : (Alternateur 1,5 KVA)	$P_A = 1$ $N_A = 1000$ t/min $i = 5$ ampères et $i = 5$ ampères	$P_A = 1$ $N_A = 1500$ t/min. $i = 6$ ampères
Machine B	$P_B = 2$ $N_B = 1600$ t/min. et 1800 t/min. Couplage $\lambda \Delta$	$P_B = 2$ $N_B = 1500$ t/min. Couplage $\lambda \Delta$
Transform. T	couplage $\lambda \Delta$ $U_2/U_1 = 1,7 \sqrt{3}$	couplage $\lambda \Delta$ $U_2/U_1 = 1,9 \sqrt{3}$

Pour une excitation $i = 6$ ampères, on a :

I_f ampères	0	1,4	2,8	4,2	5,7	7,3	9,1
U_2 volts	113	183	180	178	175	170	165
P_2 watts	0	255	500	750	1 000	1 240	1 500
U_2 %	100	99,5	98,5	97,5	95,5	93	90

Une augmentation de l'excitation de l'alternateur relève les courbes et diminue très considérablement les chutes de tension; (Planche 11).

On constate également que la chute de tension totale aux bornes du groupe est de l'ordre de grandeur de celle obtenue avec l'alternateur accouplé directement aux redresseurs. Tout se passe, à ce point de vue, comme si la machine asynchrone n'existait pas dans le circuit et, comme si n'était l'alternateur qui imposait sa propre caractéristique en charge.

En jouant sur le facteur de puissance du circuit primaire (circuit des retars) ou, mieux, en compoundant convenablement l'alternateur (caractéristique légèrement montante), on peut envisager de compenser exactement la faible chute de tension des redresseurs et obtenir une caractéristique externe absolument horizontale (Alternateur hypercompoundé).

Pour toute une série de valeurs de γ comprises entre -1 et 0, nous avons trouvé des chutes de tension de

même ordre pour la même charge P_1 et la même excitation i de l'alternateur et, avec des rapports de tension différents entre les divers éléments du groupe.

Les chutes de tension augmentent avec la charge de l'alternateur.

Dans l'hypothèse où les chutes de tension proviennent de l'alternateur, il ne faut pas rapporter à la même puissance P_3 (aux bornes des redresseurs) les tensions correspondant à $\gamma = -1/3$ et $\gamma = -1$. C'est à la puissance P_1 (aux bornes de l'alternateur) qu'il faut les ramener si on veut les comparer.

En effet, $P_1 \approx \gamma P_3$, aux pertes près, d'où:

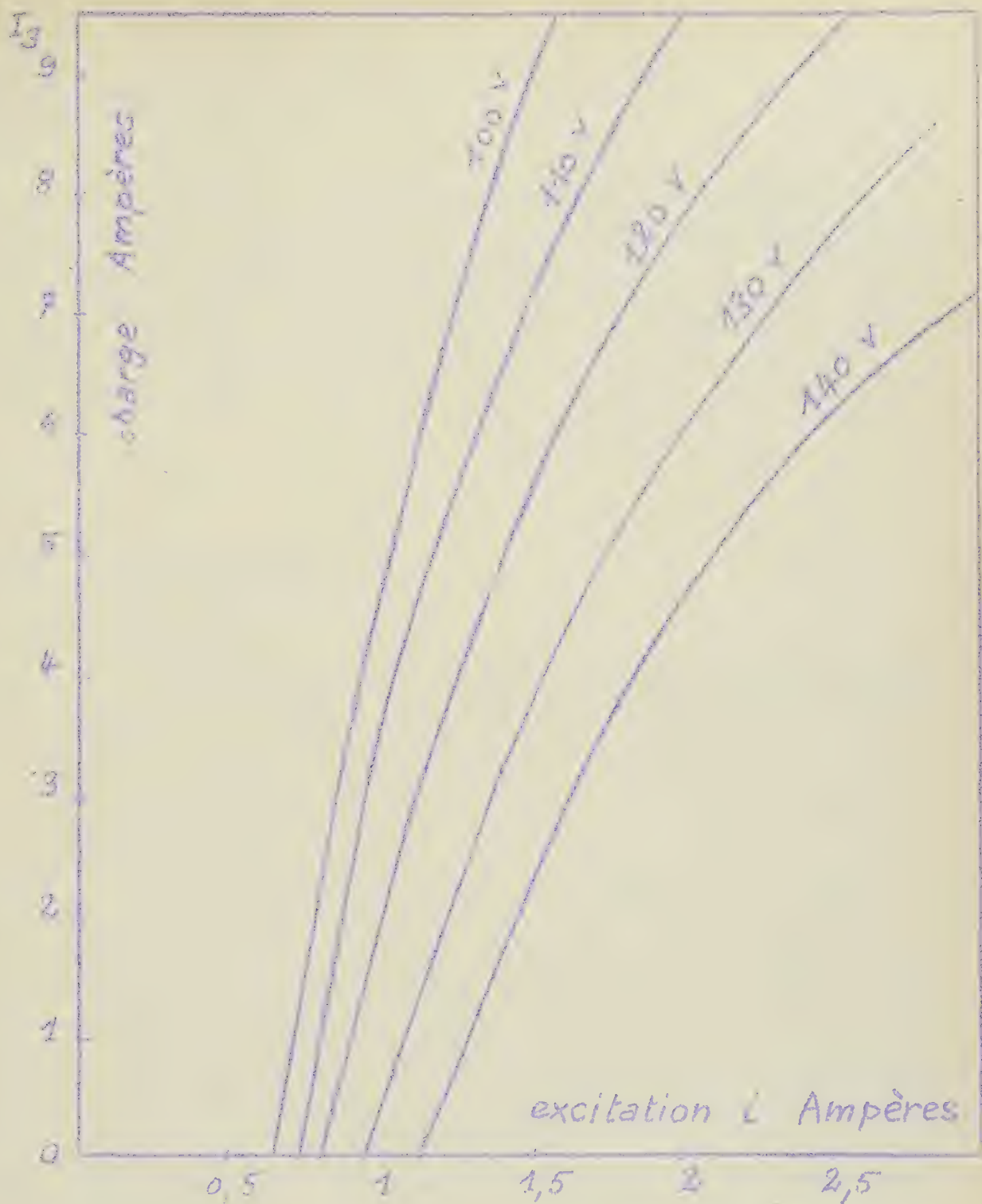
$$\begin{array}{llll} \gamma = -1/3 & P_3 \approx 3P_1 & P_1 = 500 \text{ watts} & P_3 = 1500 \text{ watts} \\ \gamma = -1 & P_3 \approx P_1 & P_1 = 500 \text{ watts} & P_3 = 500 \text{ watts} \end{array}$$

Rapportées à la même puissance $P_1 = 500$ watts, les chutes de tension, pour $\gamma = -1$ et $\gamma = -1/3$, sont du même ordre.

Notons enfin qu'on obtient des courbes d'allure comparable à celles de la planche 10 en inversant le rôle du rotor et du stator de la machine asynchrone (stator alimenté par l'alternateur).

3) Courbes de réglage : $I_3 = f(i)$.

Les courbes de réglage pour les différentes valeurs du paramètre γ , ont été établies en maintenant les vitesses N_1 et N_2 constantes ainsi que la tension U_3 à la sortie des redresseurs. Nous avons fait varier le courant I_3 en agissant sur un rhéostat de charge monté aux bornes des redresseurs et nous avons compensé les chutes de tension ΔU_3 en réglant la valeur du courant d'excitation i de l'alternateur (Planche 12).



Courbes de réglage $N=1500 \frac{r}{m}$ $\gamma=+\frac{1}{2}$
 a) excitation séparée

Les résultats obtenus nous permettent d'envisager le fonctionnement industriel du groupe à tension constante pour les valeurs positives aussi bien que négatives du paramètre γ .

Le tracé de ces courbes figurant sur la planche 12 est à rapprocher de celui de la planche 7 tracé dans les mêmes conditions : $n_A = n_B = 1500 \text{ t/min.}$ $\gamma = + 1/2$.

K. - Autoexcitation shunt.

a) Autoamorçage.

L'amorçage en fonctionnement autonome avec excitation shunt a été étudié, à dessin, dans les conditions les plus délicates, c'est-à-dire pour $0 < \gamma < 1$ (Chutes de tension relativement importantes en charge avec le matériel utilisé).

De façon à pouvoir régler avec plus de souplesse le rapport de transformation entre les éléments du groupe nous avons ajouté, en série sur le circuit rotorique, un autotransformateur à réglage continu constitué par trois "alternostats" monophasés 15 amp. 110 v / 0 v - 150 v.

Le rapport de transformation a été choisi de manière à avoir une tension élevée (175 volts) aux bornes des redresseurs pour une faible tension (30 volts) appliquée aux bornes des inducteurs (Coefficient d'amplification élevé).

Ces dispositions prises, on a fermé le circuit des redresseurs. La machine s'est amorcée en quelques secondes grâce à la seule tension résistante du groupe (quelques volts)

La tension est montée tellement vite aux bornes de la machine asynchrone qu'il a fallu prendre des précautions pour éviter de survolter les redresseurs!

Dans ce but, on a monté les éléments redresseurs en série sur chaque phase pour leur permettre de supporter, sans dommage, des tensions alternatives élevées (200 volts), de plus, on a limité la tension aux bornes des inducteurs à l'aide d'un rhéostat potentiométrique.

Une très légère charge des redresseurs facilite l'amorçage. Ce dernier étant assuré, les "alternostats" sont aussitôt éliminés, pour permettre un rapport de tensions plus favorable au tracé des caractéristiques shunt.

Il y a lieu de remarquer que l'amorçage a été également réussi SANS transformateur intermédiaire avec une tension de 45 volts entre phases aux bornes des deux rotors

b) Amorçage avec tension auxiliaire.

L'amorçage avec l'aide du secteur à courant continu du laboratoire a été réalisé de la façon suivante:

- On démarre en excitation séparée sur le secteur;
- On couple les redresseurs en parallèle sur le secteur, dès que la tension aux bornes a atteint la valeur désirée;
- On met ensuite le secteur hors-circuit, les inducteurs se trouvent alors autoexcités;
- on relève alors très facilement les caractéristiques shunt en fonctionnement autonome.

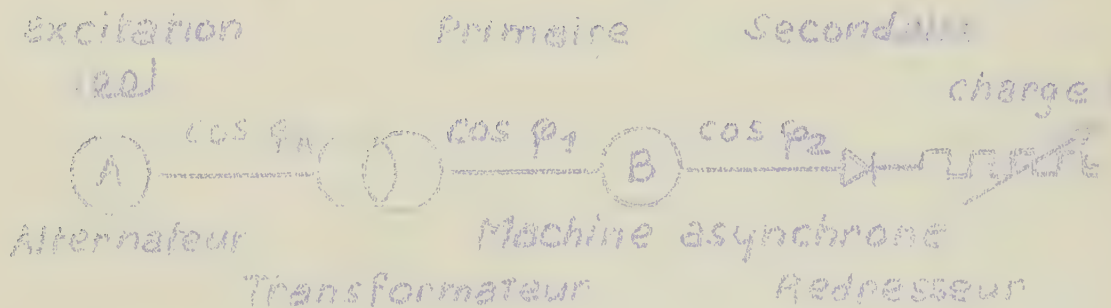
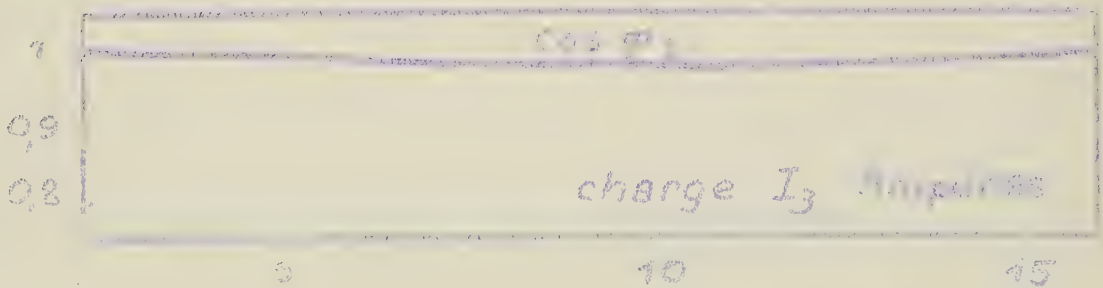
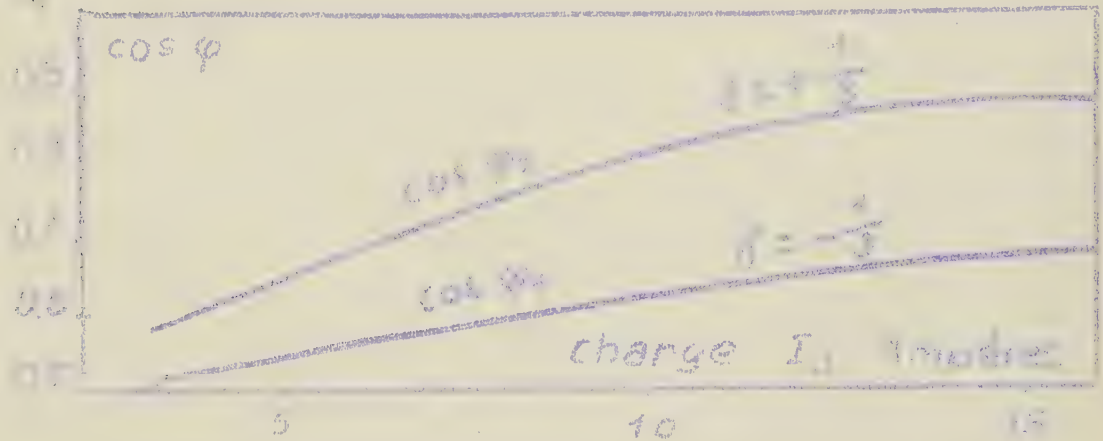
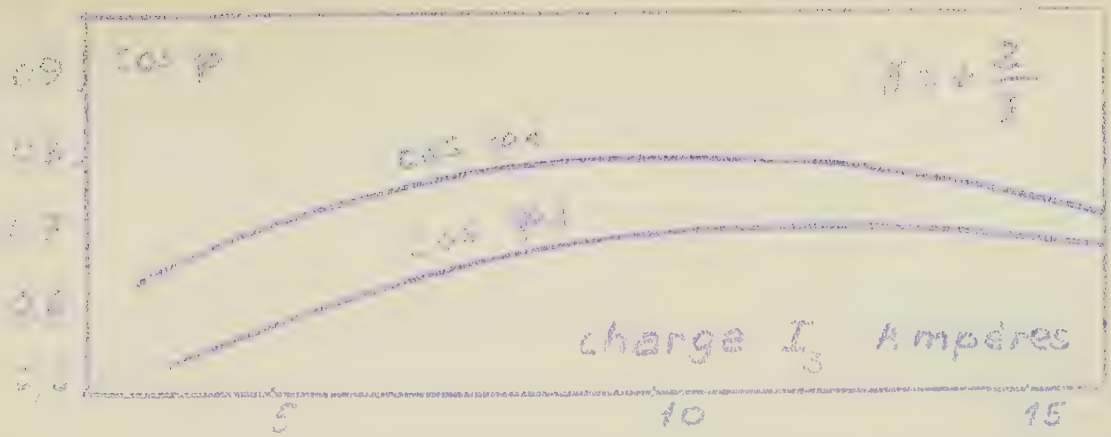
c) Caractéristiques shunt pour $\gamma = + 1/2$:

Excitation $i = 1$ ampère. $N = 1500$ t/min.						
I_3 ampères	0	1,5	3	4,5	6	7,5
U_3 volts	120	111	103	94	85	76

Excitation $i = 1,5$ amp. $N = 1500$ t/min						
I_3 ampères	0	1,5	3	4,5	6	6,4
U_3 volts	140	132	124	115	107	105

Les caractéristiques (Planche 7) sont des droites sensiblement parallèles. Elles sont décalées par rapport aux courbes établies en excitation séparée, parce que, dans le montage shunt, le courant débité par les redresseurs est la somme du courant I_3 absorbé par le rhéostat de charge et du courant i absorbé par le circuit d'excitation.

Au-dessus de 6,5 ampères et de 7,5 ampères, le groupe se désamorce, car la tension, à la sortie des redresseurs, ne suffit plus à l'alimentation des inducteurs.



Facteur de Puissance

7 - Facteur de puissance et sens de circulation des puissances:

Dans les essais réalisés, le facteur de puissance du circuit primaire ($\cos \varphi_1$) est toujours inférieur à 0,7 pour γ négatif; il se rapproche de 0,5 pour γ positif (planche 1X).

Les faibles chutes de tension (γ négatif) correspondent à une circulation en sens inverse des puissances actives et réactives dans le circuit primaire. Au contraire, les chutes de tension plus importantes (γ positif) correspondent à une propagation dans le même sens des puissances actives et réactives.

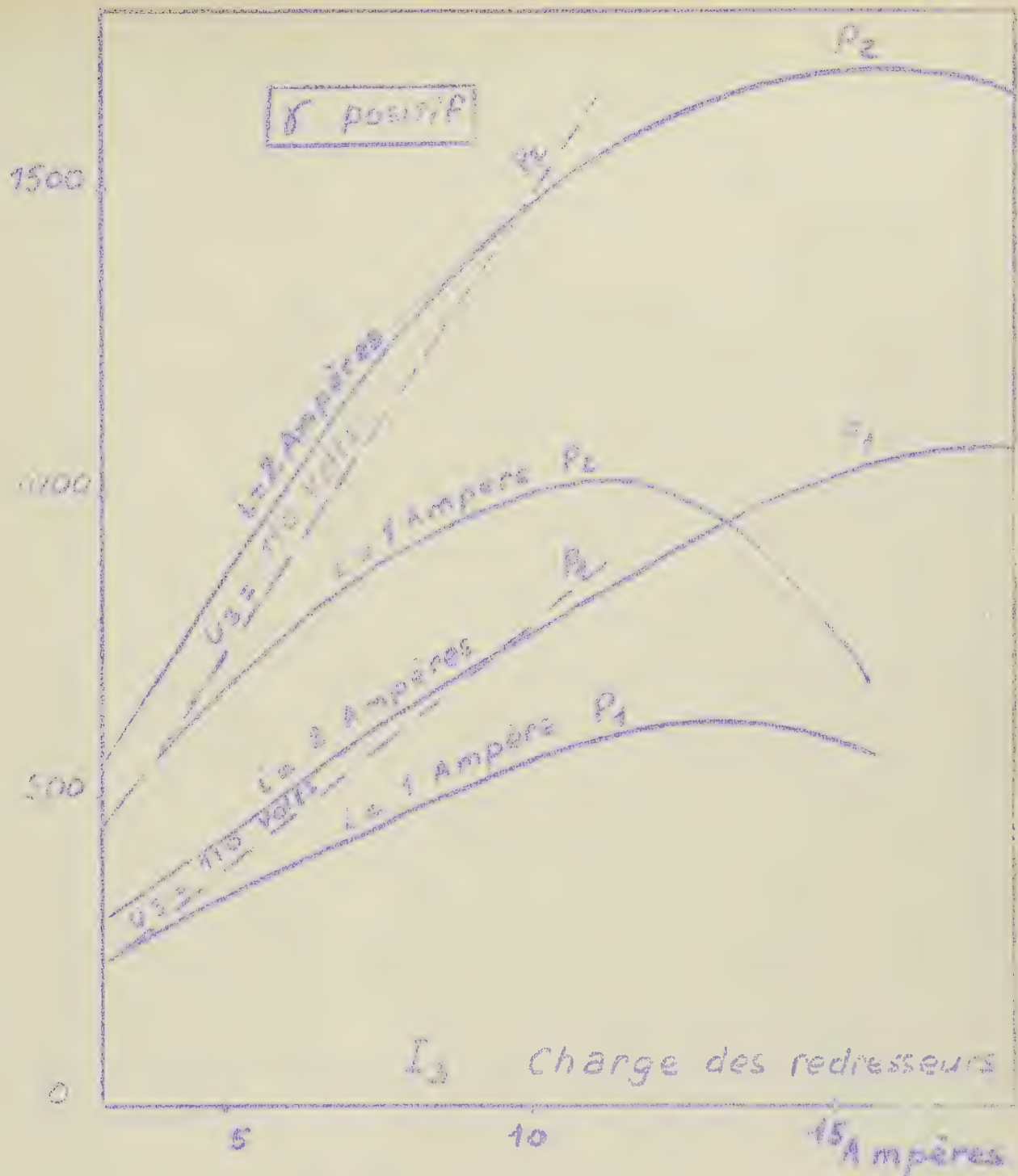
La présence des redresseurs aux bornes du stator de la machine asynchrone a fixé au voisinage de l'unité le facteur de puissance du circuit secondaire ($\cos \varphi_2$).

8 - Tracé des courbes de puissance pour $\gamma = \pm 1/2$

a) Caractéristiques à excitation constante $\gamma = 1$ (I_g)

L'alternateur 2,5 KVA (2 paires de pôles) et la machine asynchrone (2 paires de pôles) sont montés sur le même arbre et entraînés à 1 500 t/min. par un moteur auxiliaire.

On maintient la vitesse et l'excitation constantes; on fait varier la charge I_g des redresseurs, on mesure la puissance P_1 aux bornes du rotor de la machine asynchrone (primaire) et la puissance P_2 à la sortie de son



Courbes de Puissance à excitation
constante et à tension constante

pour $\gamma = +\frac{1}{2}$ $N = 1500$ t/m

P_1 puissance active provenant de l'alternateur

P_2 puissance active disponible aux bornes

stator (secondaire) - Méthode des deux wattmètres -

La planche 14 représente les courbes $P_1 = f(I_3)$
et $P_2 = f(I_3)$ pour deux valeurs de l'excitation:
 $i = 1$ ampère et $i = 2$ ampères.

$i = 1$ ampère $N = 1\ 500$ t/min $\gamma = + 1/2$						
I_3 ampères	2	3,5	4,5	6,9	11	15,5
P_1 watts	160	260	320	520	590	580
P_2 watts	315	510	620	960	1030	720

i = 2 ampères W = 1 500 t/min. γ = + 1/2							
I ₃ ampères	3	4,6	6	7,6	10	14	18
P ₁ watts	300	430	530	630	780	1000	1050
P ₂ watts	550	835	1025	1220	1480	1675	1670

Le maximum des courbes se déplace vers le haut à mesure de l'augmentation de l'excitation (Planche 14).

Remarquons que la position du maximum et l'inclinaison des courbes dépendent du rapport de tensions adopté. Les courbes ci-dessus ont été établies avec le rapport $U_A/U_1 = 1,9\sqrt{3}$ obtenu avec le couplage étoile-triangle du transformateur; le rotor de l'alternateur était lui-même monté en triangle; la machine asynchrone avait son rotor en étoile et son stator en triangle.

b) Courbes à tension constante: $P = f(I_3)$.

En s'aidant des courbes de réglage de la planche 11 et des caractéristiques de puissance de la planche 14, on peut tracer les courbes à tension constante.

Sur la planche 14, les courbes $P_1 = f(I_3)$ et $P_2 = f(I_3)$, à tension $U_3 = 110$ volts (lignes de potentiel constant), les caractéristiques à excitation constante $i = 1$ Ampère et $i = 2$ ampères aux points d'abscisse $I_3 = 3,3$ amp. et $I_3 = 9,75$ ampères.

c) Modélisation électrocinétique de la formule approchée $P_1 = f(I_3)$.

Nous avons établi la formule:

$$P_1 = \frac{P_1}{\gamma} = \left(\frac{J_1}{\gamma} + J_2 \right)$$

Où J_1 et J_2 sont respectivement les pertes dans le rotor (indice 1) et le stator (indice 2) de la machine asynchrone.

En négligeant les pertes, nous avons écrit:

$$P_2 = \frac{P_1}{\delta}$$

Vérifions sur les courbes de la planche 14 cette formule approchée (alternateur 2,5 KVA):

	i = 1 ampère		N = 1500 t/min		$\gamma = + \frac{1}{2}$
I_1 ampères	2	3,5	4,5	8,8	11
P_1 watts	160	260	320	520	590
P_2 watts	315	510	620	960	1030
$\left(\frac{P_1}{\gamma} - P_2 \right)$ watts	5	10	20	60	150
$\left(\frac{\frac{P_1}{\gamma} - P_2}{P_2} \right)$	1,6 %	1,9 %	3,2 %	6,3 %	14,5 %
$\frac{P_2}{P_1}$	1,96	1,96	1,97	1,85	1,72

$\left(\frac{P_1}{\gamma} - P_2 \right)$ représente les pertes Joule $\left(\frac{J_1}{\gamma} + J_2 \right)$;
ces pertes, exprimées en pour cent de la puissance P_2 dispo-

nible aux bornes, sont faibles. Le rapport des puissances P_2/P_1 est très voisin du rapport $1/\gamma = 2$.

On voit que, lorsque $\gamma = +1/2$, l'alternateur fournit un peu plus de la moitié de la puissance utile tandis que la machine asynchrone prend sur l'arbre le complément de puissance, soit un peu moins de la moitié de la puissance disponible.

Pour une charge $I_3 = 4,5$ ampères, la machine asynchrone fonctionne en transformateur de puissance, pour 320 watts, et en génératrice, pour 300 watts.

(Voir développement chapitre 3 p. 42 et chapitre 4 p. 54).

Une excitation différente conduit à des résultats analogues:

	I = 2 ampères		N = 1500 t/min.		$\gamma = +1/2$	
I ₃ ampères	3	4,6	6	7,6	10	14
P ₁ watts	300	430	530	630	780	1000
P ₂ watts	550	835	1025	1220	1480	1675
$\left(\frac{P_1}{\gamma} - P_2\right)W$	50	25	35	40	80	325
$\left(\frac{P_1}{\gamma} - P_2\right)/P_2$	9%	3%	3,4%	3,3%	5,4%	19%
P ₂ /P ₁	1,87	1,94	1,94	1,94	1,90	1,67

d) Influence de l'alternateur: puissances actives et réactives :

En utilisant l'alternateur 1,5 KVA, on établit des courbes de puissance (planche 13) semblables à celles tracées avec l'alternateur 2,5 KVA:

	$i = 0,4 \text{ ampères}$ $n = 1200 \text{ r/min.}$ $\gamma = \frac{1}{2}$				
I_3 ampères	5	7,5	10	12,5	15
P_A watts	570	810	1040	1230	1310
Q_A VAR	550	610	720	950	1260
S_A VA	760	1010	1250	1500	1750
P_1 watts	530	750	960	1100	1130
Q_1 VAR	550	610	720	860	1040
S_1 VA	710	960	1200	1400	1520
P_2 watts	1050	1450	1810	1910	1780
$\left(\frac{P_1}{\gamma} - P_2\right) \text{ w}$	10	50	110	200	-
$\frac{\left(\frac{P_1}{\gamma} - P_2\right)}{P_2}$	0,95%	3,4 %	6,1 %	15 %	-
$\frac{P_2}{P_1}$	1,90	1,94	1,89	1,74	-

Ces courbes, obtenues avec un rapport de tensions $U_A/U_1 = 1,9$ (couplage étoile-étoile du transformateur et étoile-triangle de la machine asynchrone), confirment les résultats obtenus avec le premier alternateur. La caractéristique P_1 est située sous la courbe P_A à cause des pertes dans le transformateur; ce qui montre le sens d'écoulement de la puissance à travers ce dernier: la puissance active va de l'alternateur vers la machine asynchrone; la machine A fonctionne "en alternateur"; la machine B fonctionne "en transformateur de puissance" vis à vis de la première machine.

Même remarque pour les puissances réactives qui se propagent de l'alternateur vers la machine asynchrone.

Les caractéristiques Q_A et Q_1 tournent leur concavité vers le haut, phénomène que l'on retrouvera sur les planches suivantes pour les valeurs de γ comprises entre zéro et l'unité.

Les courbes Q_A, Q_1 , d'une part, et P_A, P_1 , d'autre part, divergent pour les valeurs de la charge immédiatement supérieures à 5 ampères, ce point correspondant à $\cos \varphi = 0,7$.

Q_1 est inférieur à P_1 pour une charge comprise entre 5 et 16 ampères ($\cos \varphi$ croissant rapidement et dépassant 0,80 aux alentours de $I_3 = 10$ ampères).

δ positif

$$\delta = + \frac{\pi}{2}$$

$$N = 1000 \frac{r}{m}$$

2000

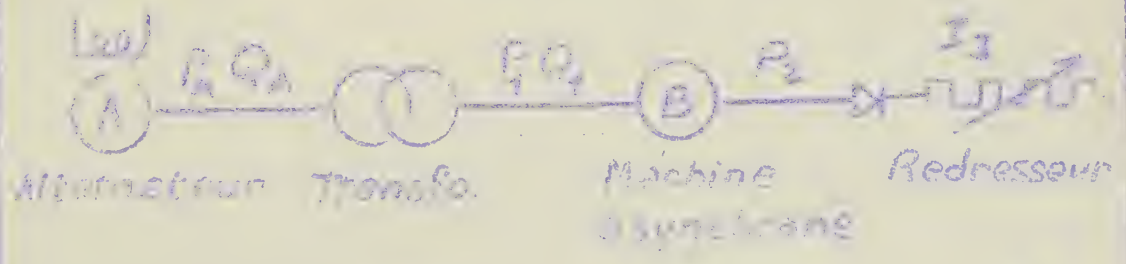
1500

1000

500



Puissances

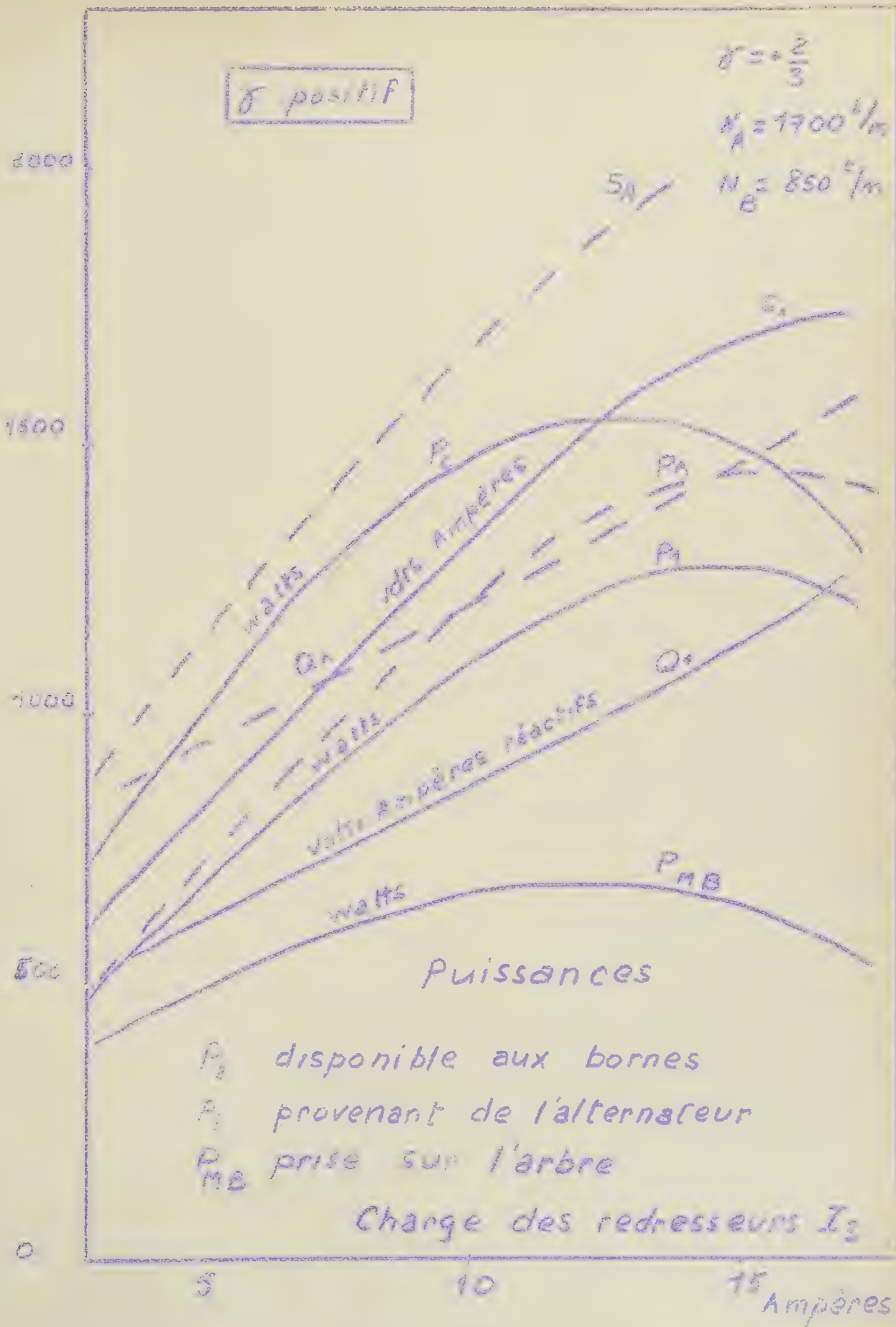


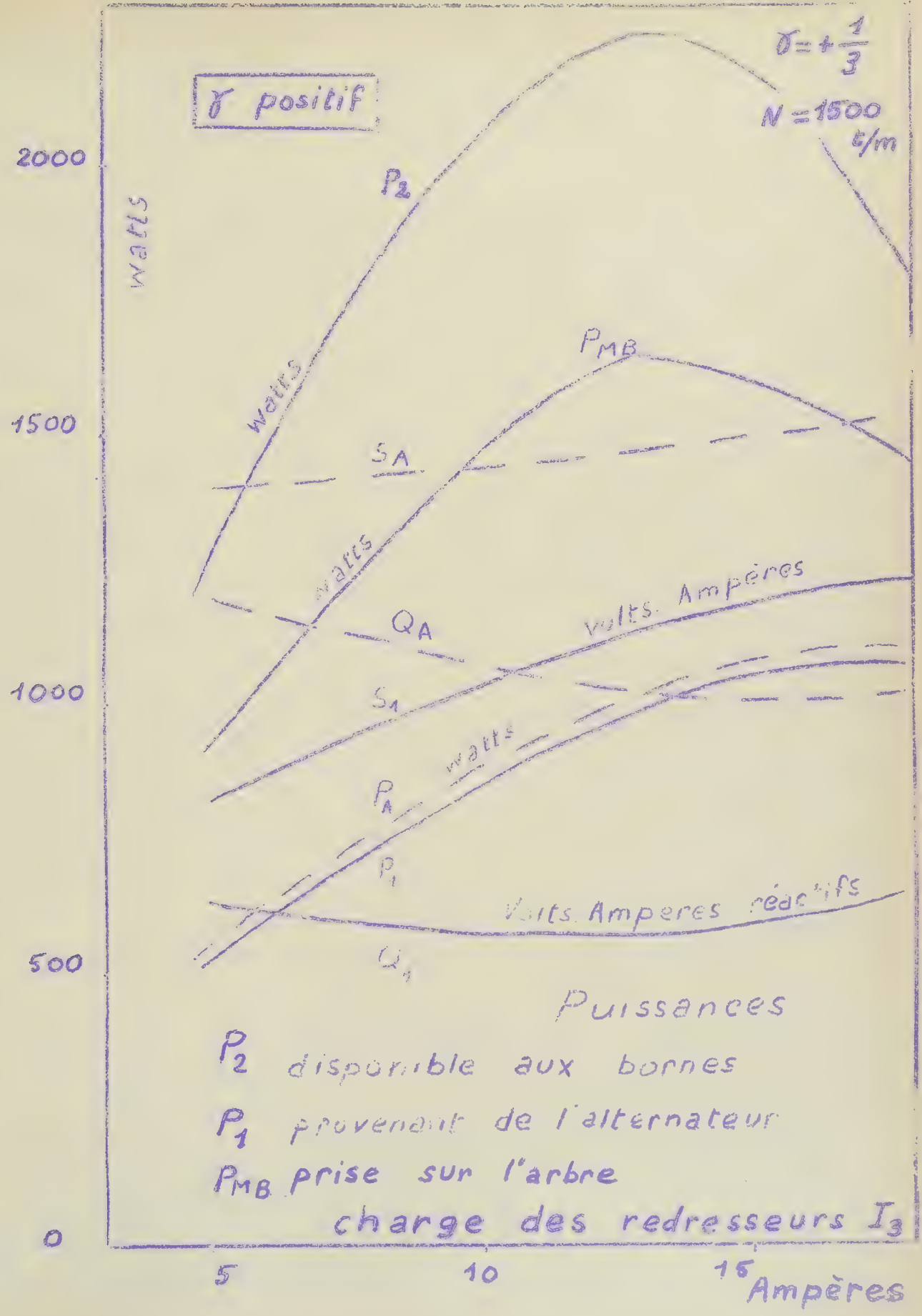
Charge des redresseurs I_3

5

10

15 Amperes





γ positif

$\sigma = +\frac{1}{3}$

$N = 1500$
t/m

Puissances
 P_2 disponible aux bornes
 P_1 provenant de l'alternateur
 P_{MA} prise sur l'arbre
 charge des redresseurs I_3

B. - Courbes de puissance pour $\delta = +1/3$ et $\gamma = +2/3$

Les conditions expérimentales ont été précisées sur le tableau de la page 66 (Caractéristiques en charge).

a) Pour $\gamma = +2/3$ (Planche 16)

	$i = 6$ ampères		$N_A = 1700 \quad N_B = 850$ t/min.		
I_3 ampères	3	6	9	12	15
P_1 watts	480	750	1000	1200	1270
P_2 watts	720	1120	1420	1540	1500
P_2/P_1	1,50	1,49	1,42	1,28	=
P_{MB} watts (x)	380	520	640	690	=
$\eta_B = \frac{P_2}{P_1 + P_{MB}}$ (x)	84 %	88 %	87 %	81 %	=

On vérifie que le rapport P_2/P_1 des puissances primaire et secondaire est très voisin du rapport théorique

$$\frac{1}{\gamma} = 3/2 = 1,50$$

tout au moins pour les valeurs de I_3 situées à gauche du maximum de P_2 .

L'alternateur fournit approximativement les 2/3 de la puissance P_2 disponible aux bornes de la machine asynchrone; le dernier tiers est produit par la machine asynchrone dans son fonctionnement "en génératrice".

(x) Valeurs approximatives.

L'ordre de grandeur du rendement de la machine asynchrone est, pour $I_3 = 6$ ampères:

$$\eta_B = \frac{P_2}{P_1 + P_{MB}} = 88 \%$$

P_{MB} est la puissance mécanique prise sur l'arbre par la machine asynchrone.

Cette valeur est entachée des erreurs dues au tarage du moteur d'entraînement E_B à la vitesse de 850 t/min. et de l'évaluation approximative des pertes provoquées par le courroie d'entraînement.

b) Pour $\gamma = + 1/3$ (Planche 17):

	$i = 5$ ampères		$N_A = N_B = 1\ 500$ t/min.		
I_3 ampères	5	8	11	13	15
P_1 watts	550	740	900	990	1050
P_2 watts	1280	1820	2150	2250	2200
P_2/P_1	2,4	2,45	2,4	2,3	2,1
P_{MB} watts (x)	940	1290	1550	1640	1600
$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{MB}}$ (x)	87 %	89 %	88%	85 %	83 %

(x) Valeurs approximatives.

Pour $\gamma = + 2/3$, les courbes P_1 , Q_1 et S_1 sont fortement inclinées; lorsque $\gamma = + 1/3$, elles se rapprochent de l'horizontale; un essai effectué à $\gamma = + 0,18$ confirme cette tendance. Autrement dit, plus le paramètre γ se rapproche de zéro, plus les puissances apparente S_1 et active P_1 de l'alternateur sont faibles. A la limite, cette machine serait un simple alternateur "pilote" dont le rôle se réduirait à fixer la tension et la fréquence du groupe.

I.- Courbes de puissance pour γ négatif

Conditions expérimentales: voir page 68

Four $\gamma = - 0,29$ (Planche 18)

	i = 5 amp. $N_A = 800$ t/min $N_D = 1800$ t/min				
I_3 ampères	3	6	9	12	15
P_1 watts	210	380	540	670	750
P_2 watts	520	1010	1410	1770	2100
Q_1 VAR	300	520	700	810	860
S_1 VA	350	630	880	1060	1150
P_3 watts	460	900	1280	1560	1820
P_{MB} watts (x)	1200	1800	2350	2780	—
P_2/P_1	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6
P_3/P_2	89 %	89 %	91 %	88 %	87 %
$\frac{P_1 + P_2}{P_{MB}}$ (x)	61 %	77 %	83 %	88 %	—

(x) Valeurs approximatives



En comparant la planche 18 ($\gamma = -0,29$) à la planche 17 ($\gamma = +1/3$), on voit immédiatement que, lorsque γ est négatif, la puissance mécanique P_{MB} est importante. En effet, la machine asynchrone prend toute sa puissance sur l'arbre et la transforme en puissance P_2 disponible aux bornes du son stator et en puissance P_1 fournie à l'alternateur (qui fonctionne "en moteur").

La courbe de la puissance réactive Q_1 débute presque tangente à la courbe de la puissance apparente S_1 ; et, au fur et à mesure de l'augmentation de la charge, elle se rapproche de plus en plus de la courbe de la puissance active P_1 (elle atteindrait P_1 pour $\cos \varphi = 0,7$). Elle est toujours supérieure à P_1 et épouse la forme de cette dernière courbe (concavité dirigée vers le bas).

Lorsque γ augmente, en valeur absolue, l'ensemble des courbes S_1 , P_1 et Q_1 se relève en se rapprochant lentement de la verticale.

On voit, d'autre part, que la puissance P_1 , à l'entrée du transformateur (côté machine B), est supérieure à la puissance P_A à la sortie du transformateur (côté machine A); ce qui montre que la puissance active se propage de la machine B vers la machine A (Comparer avec γ positif p 80).

Pour les valeurs négatives de γ , le rendement de la machine asynchrone peut s'écrire:

$$\eta_{\frac{1}{2}} = \frac{P_1 + P_2}{P_{MB}} = 88 \% \text{ pour } I_3 = 12 \text{ ampères} \\ \text{(valeur approximative)}$$

Le rendement des redresseurs utilisés

$$\eta_R = \frac{P_3}{P_2} = 90 \% \text{ environ}$$

Pour $\gamma = -1$: Résultats analogues.

J.- Cas limite $\gamma = +1$.

Alternateur $N_A = 1500 \text{ t/min.}$ $f_A = 2$ $i = 5 \text{ ampères}$
(1,5 KVA)

Machine asynchrone : $N_B = 0$ $f_B = 2$

Transformateur: Couplage $\text{Y } \Delta$ $U_A/U_1 = 1,9 \sqrt{3}$

Moteur d'entraînement bloqué ,à l'arrêt.

Dans les deux sens des connexions (connexions directes et croisées), on a :

$$P_{MB} = 0 \quad P_A = 450 \text{ watts} \quad P_1 = 420 \text{ watts} \quad P_2 = 370 \text{ watts}$$

$$f_1 = f_2 = 50 \text{ Hz} \quad P_2/P_1 = 0,9$$

Fonctionnement "en transformateur" avec un rendement de 90 %.

K.- Rendement global.

Le rendement global du groupe

$$\eta_G = \frac{P_z}{P_M}$$

peut s'écrire, avec la relation approchée $P_1 = \gamma P_2$,
pour $\gamma = +1/2$:

$$\eta_G = \frac{\eta_R \cdot \eta_A \cdot \eta_B}{\eta_A + (1 - \eta_A) \eta_B \gamma}$$

η_R = rendement des redresseurs au silicium $\approx 98 \%$

η_A = d° de l'alternateur 90 %

η_B = d° de la machine asynchrone 90 %

Cette formule ne peut nous donner qu'une première approximation du rendement ; elle nous amène à prévoir un rendement global de l'ordre de 85 %.

Des essais plus précis seraient à faire si l'on veut comparer les rendements pour les différentes valeurs du paramètre γ .

Nous pouvons seulement, avec prudence, indiquer une tendance purement qualitative et une région à explorer

$\gamma > 1$. On a intérêt à rester au voisinage de l'unité
 $0 < \gamma < 1$. Meme ordre de grandeur dans les rendements avec
 tendance à légère amélioration lorsque γ se rap-
 proche de + 1/5

$\gamma < 0$. Il faudrait étudier les valeurs de γ supérieures,
 en valeur absolue, à l'unité. Il semble que cette
 région soit intéressante.

APPENDICE .

APPLICATION

A D' AUTRES MACHINES ÉLECTRIQUES .

1.- Redresseurs montés sur le rotor de la machine asynchrone .

En inversant la disposition des bobinages des machines A et B, on peut réaliser un autre groupe sans collecteur et sans balai.

L'alternateur A et la machine asynchrone B sont toujours montés sur le même arbre. L'alternateur est à inducteurs tournants (au lieu d'être à inducteurs fixes); le stator de la machine asynchrone, devenu "primaire", est alimenté par le bobinage statorique de l'alternateur; le rotor de la machine asynchrone, devenu "secondaire", débite sur les redresseurs secs qui alimentent, eux-mêmes, les inducteurs de l'alternateur. Les redresseurs sont

PLANCHE 19

Excitation réalisée par des redresseurs secs montés
sur le rotor d'une machine asynchrone.

- (1) Stator de l'alternateur (Induit)
- (2) Rotor d° (Inducteur)
- (3) Stator de la machine asynchrone (Primaire)
- (4) Rotor de la machine asynchrone (Secondaire)
- (5) Redresseurs secs montés sur l'arbre commun

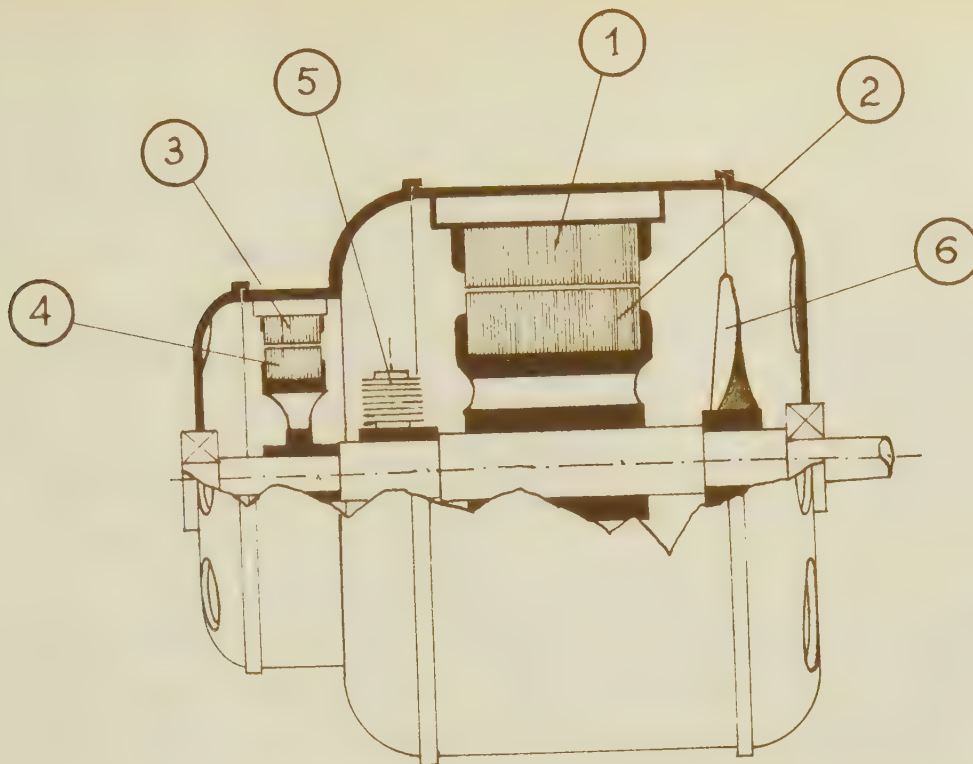


Fig. 1

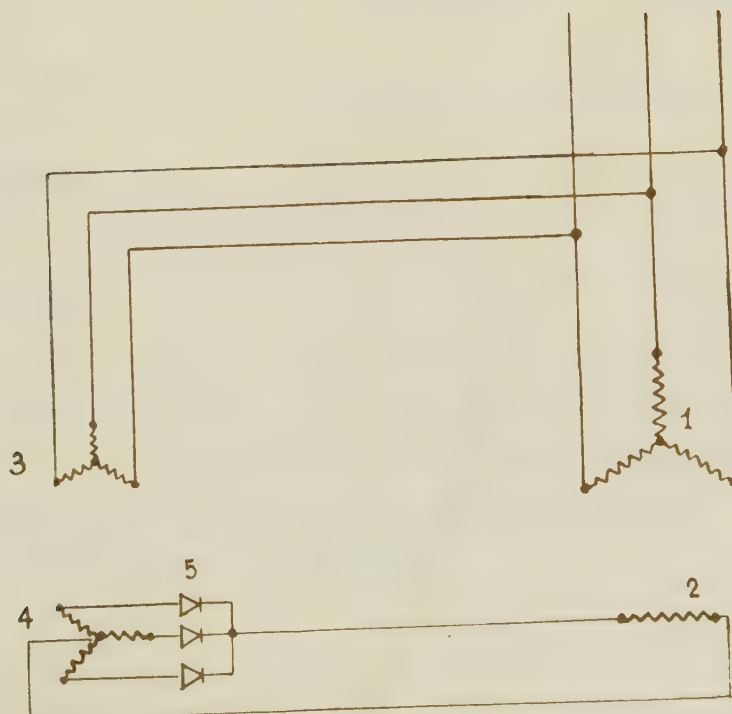


Fig. 2

montés sur l'arbre commun et tournent à la vitesse des deux rotors (Planche n° 19).

Cette disposition réalise un groupe synchrone à courant alternatif (moteur ou générateur) sans aucun contact frottant.

L'alternateur joue toujours le rôle de chef d'orchestre, imposant tension et fréquence à la machine asynchrone. Cette dernière, associée aux redresseurs secs, remplit les fonctions de l'excitatrice habituelle.

On est en présence d'une excitatrice d'un nouveau genre: son stator est alimenté par le courant alternatif prélevé aux bornes de l'alternateur principal; son rotor, couplé à des redresseurs secs tournants, constitue un collecteur SANS balai (x)

2.- Groupes sans COLLECTEUR, SANS BAGUES et SANS BALAIS.

On peut classer les machines électriques en deux catégories: celles dont l'INDUCTEUR est TOURNANT et celles dont l'INDUCTEUR est FIXE.

Deux solutions différentes répondent à ces deux types de machines,

Première solution (correspondant aux machines à INDUCTEUR TOURNANT): REDRESSEURS TOURNANTS.

Les redresseurs sont calés sur l'arbre de la machine électrique et tournent avec elle.

(x) E.Remy.- Revue Générale de l'Electricité Mars 1955 p.113 Dispositif permettant la suppression des balais des machines électriques.

Brevet français n° 1.041.625 Perfectionnement aux machines électriques tournantes

Applications :

- Alternateur sans bagues, sans balais, sans excitation;
- Moteur synchrone sans bagues et sans balais ;
- Machines asynchrones synchronisées.

Deuxième solution (correspondant aux machines à INDUCTEUR FIXE) : REDRESSEURS FIXES . Les redresseurs secs sont alimentés par un bobinage fixe; ils sont immobiles et peuvent être montés sur le bâti de la machine.

Applications :

- Dynamo à courant continu SANS collecteur et SANS balais;
- Génératrice mixte (type aviation) sans collecteur et sans balais ;
- Machines asynchrones synchronisées.

CONCLUSIONS .

I.- CONCLUSIONS TECHNIQUES INTERÉSSANT PLUS SPÉCIALEMENT LE CONSTRUCTEUR.

Le groupe générateur sans contact frottant est essentiellement constitué par trois éléments: un alternateur, une machine asynchrone montée sur le même arbre, des redresseurs.

Il est difficile de vouloir séparer les avantages provenant de l'un ou l'autre élément constitutif: il n'y a pas, en effet, juxtaposition d'éléments différents, mais interdépendance, interaction. Chaque machine complète l'autre, chacune contribue à mettre en valeur les avantages de sa partenaire pour réaliser un groupe générateur sans collecteur et sans balai.

A).- La présence de l'alternateur est indispensable au bon fonctionnement de l'ensemble. Une machine asynchrone ne possède ni fréquence, ni tension propre, il faut lui imposer sa fréquence et sa tension de l'extérieur. L'alternateur remplit cette fonction. Une machine asynchrone ne produit

pas d'énergie réactive, l'alternateur lui fournit l'énergie réactive nécessaire à son fonctionnement. Le groupe nous apparaît, dans ces conditions, comme constitué par une génératrice asynchrone "synchronisée par un alternateur pilote" qui joue le rôle de "chef d'orchestre" et "d'excitatrice".

Nous avons vu que, pour les valeurs assez voisines de zéro du paramètre γ ($\gamma = +1/3$; $\gamma = -1/3$), la puissance de l'alternateur est faible vis à vis de celle de la machine asynchrone: on est en présence d'un petit alternateur qui joue essentiellement le rôle de "pilote".

Le paramètre γ , qui est le rapport de la vitesse relative du rotor et du champ tournant à la vitesse de ce champ est algébriquement identifiable au glissement d'un simple moteur asynchrone, mais, du fait de la présence de l'alternateur, ce paramètre ne varie pas avec la charge comme le glissement d'un moteur. L'écart de vitesse entre le champ tournant et le rotor est déterminé une fois pour toutes par le nombre de pôles relatif de l'alternateur (nombre de pôles par rapport à celui de la machine asynchrone).

Le couplage se fait sans difficulté spéciale sur le secteur alternatif ou continu.

La présence de l'alternateur améliore le facteur de puissance du réseau sur lequel débite le groupe (une machine asynchrone sans alternateur abaisserait le $\cos \varphi$).

L'autoexcitation est possible grâce au rémanent et à la courbe de réponse des redresseurs secs.

L'alternateur permet la réalisation d'une excitation séparée, shunt ou compound.

La présence du redresseur est nécessaire à la suppression du collecteur.

Les progrès réalisés récemment dans la technique des redresseurs au silicium (rectificateurs et diodes) constituent un des aspects importants du groupe générateur.

Pour un courant direct de 100 amp/cm^2 , un élément redresseur au silicium a un rendement de l'ordre de 96 pour 100. La chute de tension est de 0,8 à 1 volt ; son courant inverse est de quelques microampères à quelques milliampères par cm^2 à la température ambiante ; il est donc possible de fonctionner à des températures élevées (200°C) sans augmenter d'une façon trop importante les pertes, ce qui facilite considérablement le problème du refroidissement (à 250°C , le rendement est encore de 96 pour 100).

Les dimensions de ces redresseurs sont minuscules par rapport aux redresseurs au cuivre ou au sélénium ou à oxyde de cuivre, d'où, finalement, pour des puissances très élevées (encorement de 1 à 10 fois moindre que dans les installations habituelles de cellules au sélénium) ce type de redressement est particulièrement adapté aux interrupteurs très élevés (densité de courant atteignant jusqu'à 200 ampères/cm^2 sous faible tension) et aux fréquences élevées (capacité électrostatique propre faible, grâce aux faibles surfaces des éléments).

L'isolation résiduelle est très faible avec les montages à double polarisation "au pont" (redressement des deux alternances) ; elle est de l'ordre de 4 pour 100 à 300 Hz.

Les redresseurs au silicium présentent une grande sensibilité à l'humidité, aux variations brusques de température et aux surcharges instantanées.

Le principe purement électronique de leur fonctionnement leur assure une vie illimitée, leur construction est robuste, leur entretien est presque nul; ils viennent fort heureusement s'intégrer à l'ensemble générateur et remplacent avantageusement l'encombrant et fragile collecteur en cuivre habituel.

C).- Pourrait-on supprimer la machine asynchrone et monter directement les redresseurs aux bornes de l'alternateur ?

Nous répondrons que la machine asynchrone est indispensable chaque fois qu'il est nécessaire de supprimer complètement tous les contacts frottants.

En effet, nous avons vu que la machine asynchrone remplit les fonctions de transformateur dynamique de puissance: elle transporte une puissance électrique d'un organe mobile (primaire) à un organe fixe (secondaire) -ou vice versa- en jouant le rôle d'une sorte de "collecteur magnétique". C'est elle qui permet la suppression des bagues de l'alternateur. Elle s'insère dans le circuit électrique, entre l'alternateur et les redresseurs, et joue, à l'égard de ces derniers, le rôle de transformateur de couplage, (avec possibilité de secondaires multiples). C'est un transformateur de tension pouvant avoir des prises à des tensions différentes (plusieurs tensions alternatives ou continues).

C'est la machine asynchrone qui confère au groupe sa grande souplesse d'adaptation aux cas les plus variés. La présence d'un deuxième rotor monté en cascade sur le premier donne, en effet, une assez grande latitude dans la répartition des pôles sur les deux machines.

a) Dans le cas de génératrices très rapides, on aura intérêt à connecter les rotors suivant le montage appelé "Connexions directes", pour que le nombre de pôles de la machine unique équivalente soit égal à la différence des nombres de pôles des deux machines du groupe. La présence des redresseurs aux bornes permettra, d'autre part, d'adopter des fréquences secondaires (stator) supérieures aux fréquences industrielles, donc des vitesses élevées. On utilisera la propriété de la machine asynchrone de fonctionner en changeur de fréquence pour avoir, à ces vitesses, de faibles fréquences primaires sur les deux bobinages rotoriques (faibles "pertes fer" dans les deux rotors). La suppression de tous contacts frottants, rendue possible par la présence de la machine asynchrone, facilite la construction des génératrices à vitesse très élevée, d'autant plus qu'on pourra adopter un entrefer relativement grand pour la machine asynchrone, grâce à l'alternateur qui compensera les pertes réactives.

Rappelons, de plus, que nous avons constaté que, lorsque le paramètre γ est négatif (machine asynchrone fonctionnant en génératrice vis à vis de l'alternateur et vis à vis des redresseurs), la machine asynchrone n'apporte pas de chutes de tension supplémentaires dans le circuit et que, dans ces conditions, c'est l'alternateur qui fixe la caractéristique de tension en charge.

On voit que la machine asynchrone, comme les autres éléments constitutifs du groupe, concourt à réaliser la performance demandée.

b) Dans le cas des machines très lentes, au contraire, il sera avantageux de connecter les rotors suivant le montage dit "Connexions croisées", pour que le nombre de pôles de la machine résultante soit la somme des nombres de pôles des deux machines composantes. Le montage "en cascade" des machines permet ainsi de diminuer le nombre de pôles de chaque machine élémentaire par rapport à celui de la machine unique équivalente au groupe. Le nombre de pôles total se répartissant sur les deux machines, on pourra, à diamètre égal, prendre un pas polaire plus grand, ce qui permettra d'augmenter le nombre d'encoches par pôle et, de ce fait, de mieux répartir les conducteurs dans les encoches, d'où, réduction avantageuse de la réactance de fuites. On pourra, de plus, dans ce cas, adopter un entrefer étroit, de façon à accentuer cet avantage.

Avec les connexions croisées, il y a, en effet, addition des chutes de tension en charge des deux machines. On aura donc avantage à serrer le couplage entre stator et rotor pour diminuer le plus possible le coefficient de dispersion σ . Toute réduction des fuites se traduit, d'autre part, sur le diagramme de la machine asynchrone, par une augmentation du diamètre de la circonférence et par le relèvement du facteur de puissance dimensionnement économique de l'alternateur.

c) Pour les vitesses intermédiaires, on pourra adopter l'une ou l'autre des solutions, (Connexions directes ou croisées) en tenant compte du fait que le meilleur rendement est, en général, obtenu pour des valeurs de γ un peu supérieures à zéro ($\gamma = + 1/3$, en particulier) ou

légèrement inférieures à zéro ($\gamma = -1/3$) et que les plus faibles chutes de tension correspondent aux valeurs négatives de ce paramètre ($\gamma = -1/3$).

Le choix du point de fonctionnement et des dimensions relatives des deux machines dépendra, d'ailleurs, des conditions d'utilisation et notamment du facteur de puissance du circuit récepteur. Dans le cas où le secondaire de la machine asynchrone débite uniquement sur des redresseurs, on est favorisé au maximum pour le facteur de puissance.

Remarquons qu'il est également possible de réaliser un groupe à nombre de pôles variable et, par simple changement de connexions entre rotors, de passer d'un fonctionnement à $\gamma < 0$ à un fonctionnement à $0 < \gamma < 1$ (On pourra passer ainsi de $\gamma = +1/4$ avec $p = p_A + p_B$ "Connexions croisées" à $\gamma = -1/2$ avec $p = p_A - p_B$ "Connexions directes").

D).-Rentabilité .

L'adjonction d'une machine asynchrone à la dynamo classique est économiquement viable, car elle est contrebalancée par la suppression du lourd et coûteux collecteur en cuivre, des balais et porte-balais. Son remplacement par une machine du type "moteur asynchrone", la plus simple des machines électriques tournantes (facilité de construction et prix de revient intéressant), associée à des redresseurs secs, les plus simples des redresseurs (facilité de montage) en fait une réalisation particulièrement rentable. Les deux machines

sont calées sur le même arbre, leurs rotors peuvent être identiques et leurs stators montés dans la même carcasse. La machine asynchrone ne constitue pas un poids mort, mais, nous l'avons constaté, elle participe à la production d'énergie électrique.

II. - CONCLUSIONS INTÉRESSANT PLUS SPÉCIALEMENT

L'USAGER.

A). - La nouvelle dynamo apporte une solution radicale aux problèmes posés par les contacts frottants :

1) Intensités élevées.

On connaît la difficulté de réalisation des collecteurs en cuivre à contacts frottants lorsque les densités de courant deviennent trop élevées aux balais. Nous savons maintenant que les redresseurs secs de puissance montés aux bornes d'une machine sans balai résolvent la question.

2) Vitesses élevées.

Nous avons souligné le grand intérêt du groupe sans balai pour réaliser des vitesses élevées,

3) Robustesse.

L'usure des balais et des collecteurs est quelquefois extrêmement intense:

- Influence de la pression, du taux d'humidité ou d'oxygène (Altitudes élevées) (1) (2)

(1). J.DUC. Sté Française des Électriciens. Janv. 1950 Influence de l'altitude et des températures extrêmes sur le matériel électrique à bord des avions. - (2) Chimie et Industrie Nov. 56 Thèse J. Millet

- Mauvais réglage des contacts frottants;
- Particules abrasives (poussières fines, particules métalliques);
- Isolation de la machine électrique avec certains matériaux (L'isolation aux silicones favorise l'usure rapide des balais).

Tous ces ennuis disparaissent avec la suppression des balais et collecteurs: les redresseurs secs et la machine à induction sont très robustes (On peut protéger les éléments redresseurs du milieu ambiant par un vernis ou un compound approprié); les redresseurs secs ont une très grande longévité.

APPLICATIONS.

Matériel pour la marine, les chemins de fer, l'armée, l'aviation (équipement des avions en haute altitude); Utilisation en atmosphère corrosive, dans des climats très secs avec des machines électriques isolées aux silicones (Machines de puissance élevée sous un voltage réduit s'adaptant très bien aux redresseurs secs au silicium de puissance spécifique élevée).

4) Facilité d'entretien.

La présence des balais exige une main d'œuvre qualifiée pour en assurer l'entretien: rechange et rodage des balais, réglage de la pression sur le collecteur; nettoyage des cages porte-balais pour assurer le coulisement des balais; contrôle du décalage de l'isolant entre les lames de cuivre, rectification, polissage et propreté de la surface du collecteur. Toutes ces exigences d'entretien immobilisent machines et personnel pendant un temps plus ou moins long.

Les "collecteurs magnétiques" suppriment toutes ces exigences :

par le fait qu'ils suppriment tous les contacts frottants

D'où, application possible pour les pays ne possédant pas de main d'oeuvre qualifiée : groupes générateurs atomiques de faible puissance pour les pays sous-développés (équipement du Sahara).

5) Machines immergées.

L'absence de contacts frottants permet l'immersion totale ou partielle de la nouvelle dynamo sans balai dans un liquide de refroidissement:

- Immersion des redresseurs secs dans le cas des machines à très fortes intensités (Evacuation des calories par évaporation de tétrachlorure de carbone).
- Immersion des machines tournantes (groupes alternateur-turbine hydraulique immergés dans l'eau de la conduite forcée).

6) Absence de parasites radioélectriques.

La suppression des étincelles écart aux collecteurs apporte une nouveauté dans la lutte contre les parasites, nouveauté extrêmement intéressante: non seulement, les redresseurs secs ne donnent aucun parasite, mais ils étouffent les parasites existants (Economie des dispositifs antiparasites).

APPLICATIONS.- Radiodiffusion, télétransmission, groupes générateurs portatifs pour l'armée de terre et de l'air, groupes électrogènes; possibilités d'installer un poste émetteur à proximité d'un poste récepteur (Équipement du Sahara).

7) Matériel antidéflagrant.

Grâce à l'absence d'étincelles aux balais, la dynamo sans collecteur peut être utilisée à proximité de produits explosifs ou inflammables (marine, aviation, équipement des pétroliers géants (tankers), aménagement des centres pétroliers du Sahara (stations de pompage, etc..)

B).- Solution à quelques problèmes particuliers.

1.- Réduction du diamètre de certaines machines électriques. (Machines à faible vitesse).

Dans la construction d'une machine à faible vitesse de rotation, on est très souvent gêné par le grand nombre de pôles, qui entraîne un encombrement diamétral important (Problème des génératrices entraînées par des turbines hydrauliques de très basses chutes, centrales marémotrices).

Si l'on adopte $\gamma = 1/2$, chaque machine du groupe aura la moitié du nombre total de pôles. D'où, possibilité de diminuer facilement l'encombrement diamétral et de réaliser un groupe de type allongé monté dans une carcasse en forme de cigare (Application en hydraulique aux "groupes bulbes" pouvant être immergés dans la conduite d'alimentation de la turbine grâce au faible diamètre).

2.- Génératrices à fréquence élevée.

La deuxième machine du groupe fonctionne en multiplicateur de fréquence .

Application pour l'aviation: "Génératrice mixte" à courant continu et à courant alternatif à fréquence élevée.

III. — Tous ces renseignements physiques et mathématiques nous ont permis de nous montrer les principales conditions d'utilisation du groupe générateur. Tous ces renseignements nous ont permis de nous

montrer plus complètes, nous a permis de préciser les conditions d'utilisation optimale. Cependant, les renseignements nous ont permis de nous montrer la parfaite viabilité de l'ensemble, sa robustesse, sa facilité de construction et les bonnes conditions de fonctionnement, autant de qualités qui autorisent des espoirs certains.

BIBLIOGRAPHIE

A - REDRESSEURS

- (1) NICHELIS - Les redresseurs de puissance au Germanium et au Silicium. - Bull. de la Sté Belge des Electriciens. Oct.-Déc. 1956 p. 279-286.
- (2) DEMARQUIN - Les Redresseurs au Silicium. - L'Electricien Mars 1957
- (3) R. SABBIA - Les redresseurs de puissance au Germanium. - L'onde Electrique Mars 1956 no 148
- (4) BARONVENDRO - Silicon Power Rectifier for A.C. Line Operation. Electronics U S A 1955, 28, n°4 p. 149-9
(Redresseur de puissance au silicium pour exploitation sur réseau)
- (5) T.H. FARMAN, G.A. GARNICK, B.G. TIERNO, A.J. BLUNDELL - Germanium and Silicon Power Rectifiers. - Proc. Inst. Electr. Engrs. Part A.G.B. (1956) 103. N°8, p. 89-107 (31 références)
- (6) J. LAMOURILLIER - Les redresseurs de courant dans l'industrie. Eyrolles Paris 1956
- (7) G.A. GARNICK - Germanium Power Rectifiers. - Trans. North Atlantic Electr. Engrs (1955) 45 N°7 p. 197-217
(Redresseurs de puissance au germanium)
- (8) A. JAKS et E. RENE - Générateur excubrons à autoexcitation et à autorégulation. A.E.G. Mitt. Mar.-avril 1954 t. 44 p. 92-94. (Redresseur assurant l'amorçage du générateur)

- (9) G.O. ISAACSON. - Selenium Rectifiers for high temperature Operation. Communic. Electron. U S A (1955) n°20 p.552-7
(Les redresseurs au Sélénium fonctionnant à haute température).
- (10) E. REMY. - Dispositif permettant la suppression des balais de machines électriques. - Revue Générale de l'Electricité Mars 1955 p.113 à 118
- (11) E. REMY. - Perfectionnements aux machines électriques tournantes B.F. N° 1.041.825 mai 1951
- (12) E. REMY. - Génératrice de courant continu sans collecteur ni balais .B.F. N° 1.040.722 (Avril 1951)
- (13) WESTINGHOUSE ENGINEER. - An Environment-free Aircraft Generator Westinghouse engineer (Janv.1956)
(Redresseurs au silicium montés sur le rotor d'un alternateur tournant à 8 000 t/min).

B. - MACHINE ASYNCHRONE.

- (14) R. LANGLOIS-BERTHELOT. - Les moteurs électriques pour toutes applications. Eyrolles Paris 1950 p.2 à 90
- (15) N.V. BOTAN, I. FILIPINC, A. POEATA et I. REJAN. - Etude du comportement du moteur asynchrone à cage, alimenté par une génératrice asynchrone. - Buletinul Inst. Pol. Jasi 1959 t. I-V fasc.1-2 p.213-227.
(Alimentation de réseaux ruraux en Roumanie par génératrice asynchrone à autoexcitation par condensateurs; chutes de tension importantes provoquant le désamorçage de la génératrice).
- (16) W. SCHULZKI. - Induktionsmaschinen. Springer Verlag 1957
Wien p.389

- (17) E. JACOB .- Application d'un couplage en cascade de deux machines en vue d'augmenter le pas polaire des groupes générateurs synchrones à très faible vitesse. - Revue Générale de l'Electricité Tome 61 n° 5 Mai 1952 p.213 -17
(Etude de la stabilité.-Diagramme).
- (18) A. J. BONIARD .- Asynchrone und synchroner Betrieb der allgemeinen doppelgespeisten Asynchronemaschine. - Archiv für Elektrotechnik 30 (1936) S. 483 bis -502
(Fonctionnement asynchrone et synchrone d'une machine asynchrone à double alimentation).
- (19) P. JALLAT .- Les arbres électriques en régime statique. - Revue Générale de l'Electricité t.64 N°12 Dec. 1955 p.671
Article suivi d'une importante bibliographie .
- (20) J. KUOUEI .- Hyper und Hyposynchrone Maschinen. - Elektrotechnik und Maschinenbau. - Wien Heft 11 Seite 244
(1° juin 1957)
- (21) J. FALLOU .- Leçons d'Electrotechnique Générale. Gauthier-Villars Paris 1939 tome 2 p. 628 à 645.
- (22) A. MARCHOD et L. VELLAND .- Elements d'Electrotechnique tome II. Couplages en cascade des machines à induction p.281 à 287 Dunod Paris 1950
(Importante bibliographie p.287 -288)
- (23) E. DIEZELLE .- L'arbre électrique. Revue Brown-Boveri Août 1945 N°8 p.263.
- (24) H. ENOLD et LA COUR .- Les machines à induction. Delagrave Paris 1912 (Traduction Dermine et Paget).
- (25) G. CHOREIN .- L'arbre électrique. Bull. Institut de la Cie Electromécanique Document Technique N°10 Sept. 1936 p.35 à 43 (article suivi d'une bibliographie)

C. - ÉTUDE DES DELAIS COLLECTEURS DE COURANT.

- (26) J. MILLIET .- Contribution à l'étude des délais et du contact glissant.-Bulletin de la Soc.Fr.des Electriciens tome VII sept.1957 n°81 p.574
[Étude de l'usure des délais de contact en atmosphère plus ou moins humide ,corrosive ou raréfiée).
- (27) P. R. MAIRIE .- Eléments d'une théorie des contacts glissants .-Revue Générale de l'Electricité Avril 1957 tome 56 n°4 p.207
- (28) J. DUC .-Influence de l'altitude et des températures extrêmes sur le comportement des matériels électriques à bord des avions .-Bull.Soc.Fr.des Electriciens t.X n°100 p.27

TABLE DES PLANCHES .

Pages

<u>Planche 1.</u> - Génératrice à courant continu SANS collecteur et SANS balais . (Redresseurs montés sur le stator de la machine asynchrone)	2 bis
<u>Planche 2.</u> - Génératrice mixte à courant continu et à courant alternatif SANS collecteur et SANS balais..	5 bis
<u>Planche 3.</u> - Courbes du rapport des vitesses, des fréquences et des nombres de pôles.....	22 bis
<u>Planche 4.</u> - Mêmes courbes avec convention de signe généralisée.....	27 bis
<u>Planche 5.</u> - Courbes du rapport des puissances.....	44 bis
<u>Planche 6.</u> - Courbes à vide.....	61 bis
<u>Planches 7 à 11:</u> Caractéristiques en charge :	
Pl.7 - Caractéristiques à excitation séparée et shunt	63 bis
Pl.8 - Chute de tension en pour 100 de la tension à vide pour $\gamma = + 1/2$	63 bis
Pl.9 - Influence de la valeur du paramètre γ ; ..	63 bis
Pl.10 - Comparaison des chutes de tension pour $\gamma = - 1/3$ et $+ 1/3$	63 bis
Pl.11 - Chute de tension pour $\gamma = - 0,29$	67 bis
<u>Planche 12.</u> - Courbes de réglage	70 bis
<u>Planche 13.</u> - Facteur de puissance.....	73 bis
<u>Planche 14.</u> - Courbes de puissance .Influence de l'excitation.....	74 bis

Planches 15 à Planche 17 Courbes de puissance pour γ positif:

Pl. 15	$\gamma = + 1/2$		108
Pl. 16	$\gamma = + 2/3$		109
Pl. 17	$\gamma = + 1/3$		110

Planche 18 Courbes de puissance pour γ négatif:

	$\gamma = - 0,29$		111
--	-------------------	-------	-----

Planche 19 Alternateur sans balais

(Redresseurs montés sur le rotor de la machine
asynchrone)

Planche 20 Schéma d'implantation des appareils

dans le laboratoire d'essais.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Introduction	1
<u>Chapitre 1.-Présentation du groupe "Machine asyn- chrone-Redresseurs secs".</u>	
- Génératrice à courant continu.....	2
- Génératrice mixte à courant continu et à courant alternatif.....	5
<u>Chapitre 2.- Etude du fonctionnement :</u>	8
- Tableau résumant le sens de rotation des champs dans les différents cas.....	20
- Tableau donnant les valeurs de γ et de q lorsque les connexions sont directes et croisées.....	23
<u>Chapitre 3.- Répartition des puissances.....</u>	30
- Tableau des valeurs comparatives des puissances.....	47
- Tableau donnant le signe des puissances en fonction de γ	48
<u>Chapitre 4.- Résumé des différentes fonctions de la machine asynchrone</u>	51
<u>Chapitre 5.- Partie expérimentale:</u>	
A.- Matériel utilisé.....	55
B.- Montages utilisés.....	57
C.- Schéma électrique pour les essais.....	60

D.-	Tracé des caractéristiques à excitation séparée		
-	Courbe à vide		61
-	Caractéristique en charge (Etude des chutes de tension pour γ positif et γ négatif)		64
-	Courbes de réglage		70
E.-	Autoexcitation shunt (Autoamorçage)		71
F.-	Facteurs de puissance et sens de circulation des puissances		74
G.-	Tracé des courbes de puissance pour $\gamma = + 1/2$..		74
H.-	d°	d° pour $\gamma = + 1/3$ et $+ 1/2$	81
I.-	d°	d° pour $\gamma = - 0,29$	83
J.-	Cas limite $\gamma = + 1$		85
K.-	Rendement global		85

APPENDICE. -Application à d'autres machines électriques:

1.-	Redresseurs montés sur le rotor de la machine asynchrone	87
2.-	Groupes sans collecteur, sans bagues et sans balais	88

CONCLUSIONS :

I.-	Conclusions techniques intéressant plus spécialement le constructeur	90
II.-	Conclusions intéressant plus spécialement l'utilisateur	97

<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	102
----------------------------	-----

<u>TABLE DES PLANCHES</u>	106
---------------------------------	-----

DEUXIEME THESE.

PROPOSITIONS DONNEES PAR LA FACULTE :

LES TENDANCES MODERNES DANS L'EQUIPEMENT
HYDRO-ELECTRIQUE DES TRES BASSES CHUTES.

Vu et Approuvé :

Clermont, le II Février 1958

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

H. DELANGE

Vu et Permis d'imprimer: le 13 Février 1958

Le Recteur de l'Académie de Clermont

P. LOUIS

